О.Н. РАЕВ

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ И ЗВУКА ПРИ КИНОСЪЁМКЕ

МОСКВА
ВГИК
2018

УДК 778.5.04.071.5
ББК 37.95
Р16

Р16 **Раев О.Н**. Преобразования изображения и звука при киносъёмке. — М.: ВГИК, 2018. — 135 с.

ISBN 978-5-87149-233-8

В книге популярно изложены законы преобразования изображения и звука в результате их дискретизации в кинематографических технологиях. Приведены практические примеры искажений, возникающих в результате дискретизации при киносъёмке.

Для студентов киновузов и киношкол, аспирантов, операторов, режиссёров и других специалистов кинематографа, а также для всех, кто стремится разобраться в технологии цифровой киносъёмки и видеосъёмки.

УДК 778.5.04.071.5
ББК 37.95

ISBN 978-5-87149-233-8

© Раев О.Н., 2018
© ВГИК, оформление, 2018

ВВЕДЕНИЕ

За последние 25 лет кардинально изменилась и технология фильмопроизводства, и кинотехника, используемая при производстве кинематографических произведений, существенно расширился ассортимент и возможности основной и вспомогательной кинотехники. Цифровые технологии коренным образом изменили сам кинематографический процесс, позволили переместить многие функции и операции со съёмочной площадки на послесъёмочный период фильмопроизводства (часто называемый постпродакшен) и существенно расширили возможности реализации творческих замыслов создателей кинофильма.

Перефразируя известную цитату, можно объявить, что цифровая революция в кинематографе свершилась. Переход с плёночных технологий на цифровые в фильмопроизводстве завершён безоговорочно. Даже самые консервативные скептики признали неоспоримые преимущества и существенно более широкие возможности, предоставляемые цифровыми технологиями. А если учесть происходящий прогресс цифровых технологий, то можно с уверенностью прогнозировать появление новых технологий, которые в ближайшее время существенно изменят всю технологию фильмопроизводства (см. об этом, например, в [4]).

Быстро происходящие масштабные изменения в технологии фильмопроизводства требуют критического анализа и непрерывной корректировки существующего образовательного процесса в области программ подготовки творческих специалистов высшего уровня [2]. Необходимо оперативно

реагировать и отвечать на вопросы: как, чему и с какой глубиной знаний готовить будущих специалистов нового кинематографа.

Если принять точку зрения, что творческим вузам следует учить студентов только творчеству, то техникой студенты будут заниматься исключительно с позиций пользователя (потребителя). В результате выпускники ВГИКа — будущие операторы — получают в основном гуманитарное образование, а функции технической реализации творческих замыслов режиссёров операторы передают инженерам (техническим специалистам), сопровождающим используемые в съёмочном и послесъёмочном периоде технические и программные средства. Но даже в этом случае оператор должен знать возможности, ограничения и принципы работы технических средств. И кроме того, сохраняются виды кинематографа, не позволяющие создавать большие съёмочные группы, для успешной работы в которых операторам необходимы более глубокие технические знания.

Другая сложность организации образовательного процесса — это существенно разный уровень знаний, навыков и умений поступающих в вуз. В большинстве своём, даже на операторском факультете, поступающие — это гуманитарии, которые часто не умеют решать самые простейшие расчётные задачи. Среди студентов всегда есть и такие, кто уже имеет специальное профессиональное образование или первое высшее образование, в том числе те, у кого первое специальное или высшее образование — техническое. При таком разбросе базовых знаний трудно готовить и проводить аудиторные занятия по изучению техники. Всегда найдутся студенты, которые не способны воспринять техническое изложение материала, а с другой стороны, другие студенты, которых, с их точки зрения, будет не удовлетворять низкий уровень изложения материала по техническим дисциплинам. Поэтому, ориентируясь на средний уровень подготовки студентов, всё же необходимо создавать условия, при которых наиболее продвинутые студенты получат возможность более глубокого развития.

В настоящей книге предпринята, опираясь на теорию преобразования сигналов в кинематографе, попытка популярного изложения возможных искажений, возникающих в результате дискретизации сигналов в кинематографе в практических ситуациях. Книга может стать учебным пособием для студентов кинооператорского факультета и также будет полезна для студентов других факультетов.

Изложение материала построено с учётом того, что студенты обучаются в творческом вузе, когда кинотехника и кинотехнологии рассматриваются лишь как средство, позволяющее реализовать творческие замыслы.

Будем помнить, что специалисты, вооруженные знаниями, в состоянии решать любые конкретные практические задачи, стоящие перед ними.

1. ПОНЯТИЕ О СВЕТОВОМ ПОЛЕ

Свет это электромагнитное излучение в диапазоне длин волн от 0,01 нм до 1 см. Из всего этого диапазона длин волн человеческий глаз воспринимает только излучение, соответствующее длинам волн от 380 до 700 нм, которое называется видимым излучением. Границы диапазона длин волн видимого излучения носят условный характер, поскольку глаз человека наименее чувствителен к граничным длинам волн.

В дальнейшем под светом будем понимать видимое электромагнитное излучение, представляющее собой совокупность громадного количества фотонов, непрерывно излучаемых источниками света и перемещающихся в пространстве.

Каждый фотон это неразделимая порция электромагнитной энергии W. Количество энергии, которую содержит фотон, определяет частоту ν электромагнитных колебаний электрической и магнитной напряжённости — чем больше энергия фотона, тем больше частота электромагнитных колебаний:

$$W = h\nu, \tag{1.1}$$

где $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка, мировая константа.

Каждый фотон перемещается в вакууме прямолинейно с постоянной скоростью c = 299792,5 км/с.

Фотон можно характеризовать не только частотой электромагнитных колебаний ν, но и длиной волны λ, т. е. рас-

стоянием, которое пролетает фотон за время одного периода колебаний T:

$$\lambda = cT. \tag{1.2}$$

причём величина периода колебаний T обратно пропорциональна частоте колебаний ν:

$$T = \frac{1}{\nu}. \tag{1.3}$$

При прохождении фотонов через какую-либо среду, их скорость уменьшается и становится равной

$$V = \frac{c}{n}, \tag{1.4}$$

где V — скорость света в среде, n — показатель преломления среды.

Скорость фотонов в воздухе примерно такая же, как в вакууме.

Свет (поток фотонов) излучается источниками света (Солнце, звёзды, огонь, молния, световые приборы и т. д.). К основным техническим источникам света относятся тепловые (температурные), люминесцентные, светодиодные, смешанного излучения и лазеры.

Каждый фотон, излучённый источником света, перемещается прямолинейно в направлении, в котором он вылетел из источника света, до границы между двумя средами, имеющими разные показатели преломления. Когда фотон достигнет границы между двумя средами, то он может отразиться от границы двух сред (тогда он будет двигаться в той же среде, но в новом направлении) или пройти во вторую среду (произойдёт преломление направления движения фотона, в результате чего фотон продолжит своё движение в новой среде, но с изменённой скоростью и с изменённым направлением движения).

Кроме того, в любой среде возможно поглощение фотона материалом среды, через которую он проходит.

Таким образом, под световым полем в определённом пространстве понимают непрерывно изменяющуюся сово-

купность всех фотонов, наполняющих данное пространство. Математически описать такую очень быстро изменяющуюся во времени совокупность фотонов не представляется возможным из-за громадного количества независимых друг от друга непрерывно перемещающихся фотонов, непрерывного их поглощения и непрерывного испускания новых фотонов источниками света.

Поскольку все объекты окружающего мира находятся в трёхмерном пространстве (по крайней мере, именно так воспринимает человек окружающий его физический мир), то для описания светового поля (например, на съёмочной площадке) потребуется разбить поверхности всех объектов на малые участки (размеры участков должны быть настолько малы, чтобы человек не мог различить их при существующей у него остроте зрения). При этом каждый такой участок каждой поверхности каждого объекта характеризуется тремя пространственными координатами, причём расположение начала координат и направление координатных осей могут быть произвольными.

Таким образом, для описания светового потока от каждой элементарной площадки каждого объекта потребуется ввести три пространственные координаты, описывающие местоположение этой элементарной площадки.

Поэтому световое поле обычно представляют как совокупное распределение световых потоков, излучаемых или отражаемых всеми участками всех объектов во всех возможных направлениях в течение времени восприятия или записи (киносъёмки) световой информации о наблюдаемых объектах или их изображениях. Световой поток, излучаемый или отражаемый каждым участком каждого объекта в каком-то фиксированном направлении, описывается двумя параметрами: яркостью и спектральным составом, которые, в общем случае, изменяются при изменении горизонтального и вертикального углов наклона рассматриваемого направления движения излучаемого или отражённого света относительно нормали к данному участку поверхности. Следовательно, световой поток, излучаемый или отражаемый каждым участком

каждого объекта, характеризуется не только яркостью и спектральным составом видимого излучения, но и двумя пространственными углами, определяющими пространственные направления движения фотонов от рассматриваемого участка поверхности объекта.

Яркость объектов может изменяться со временем, а объекты могут перемещаться относительно друг друга. Эти изменения описываются функциями, зависящими от времени.

Итак, световое поле может быть представлено совокупностью яркостей всех элементарных участков поверхностей объектов, заполняющих пространство. Тогда световое поле, как совокупность яркостей элементарных площадок объектов, зависит от семи координат: трёх пространственных координат элементарных площадок объектов, длин волн излучаемого или отражённого элементарной площадкой света, времени и двух пространственных углов, характеризующих направление движения рассматриваемого луча света относительно нормали к каждой элементарной площадке.

Однако подобное описание светового поля сегодня возможно только с помощью компьютерных программ, где световые поля представлены моделями виртуальных объектов, к тому же отличающихся от реального физического мира той или иной степенью приближения. Записать и воспроизвести реальное световое поле в настоящее время существующими техническими средствами невозможно. Более того, в этом нет необходимости, поскольку такое поле является чисто информационным и в лучшем случае может предоставить информацию для создания, например, кинофильма.

Сегодня идут активные исследования в области новых кинотехнологий, направленных на фиксацию светового поля, наблюдаемого из некоторого ограниченного пространства. Это позволяет фиксировать только те фотоны, направления движения которых приводят к попаданию фотонов в место фиксации светового поля. Тогда от функции светового поля можно перейти к плеоптической функции, существенно уменьшая количество записываемой световой информации, хотя и в этом случае количество информации оказывается

громадным по сравнению с информацией, сохраняемой в обычном кинематографе.

Разработкой подобных технологий в настоящее время занимаются создатели плеоптических камер [6] и дисплеев светового поля [51].

Сокращая область фиксации светового поля до размеров входного зрачка киносъёмочного объектива, переходим к технологии кинотеатрального кинематографа: формированию изображений с помощью объектива и записи сформированных оптических изображений светочувствительным слоем матрицы киноаппарата или киноплёнки. Здесь регистрируется световой поток, идущий от объектов съёмки в то место пространства, где расположен киносъёмочный объектив. Этот световой поток назовём исходным сигналом киноизображения, его информационная насыщенность сужается из-за потери информации о сигналах киноизображения, распространяющихся в других направлениях. Записываемый кинокамерой сигнал киноизображения будет зависеть уже только от пяти координат: трёх пространственных координат расположения элементарных участков поверхностей объектов съёмки, времени и спектрального состава светового потока.

2. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СИГНАЛОВ КИНОИЗОБРАЖЕНИЯ В ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКЕ

Значительная часть вопросов формирования, преобразования и воспроизведения киноизображения вполне удовлетворительно решается с помощью законов геометрической оптики, которую можно рассматривать как предельный случай физической оптики, когда длина волны света стремится к нулю.

В геометрической оптике под светящейся точкой понимают источник излучения, не имеющий размеров, под световым лучом — линию, вдоль которой распространяется энергия излучения, под пучком света — совокупность световых лучей.

Всё пространство (до киносъёмочного объектива и после него) делится на две части: пространство, в котором находятся объекты съёмки, называемое пространством объектов съёмки, и пространство, в котором расположены изображения объектов съёмки, называемое пространством изображений.

2.1. ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТИВОМ

Пространство объектов съёмки наполнено различными объектами съёмки, расположенными на разном расстоянии от киносъёмочного аппарата.

Свет, отражённый или излучаемый объектами съёмки (на рис. 2.1 объекты съёмки *A*, *B* и *C*) и попадающий во вход-

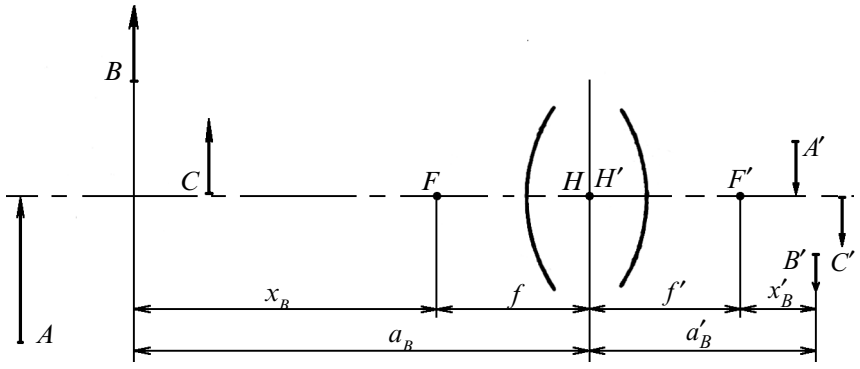


Рис. 2.1. Схема формирования объективом изображений:
A, *B*, *C* — объекты съёмки; *A′*, *B′*, *C′* — изображения объектов *A*, *B*, *C*; *F* — передняя фокальная точка объектива; *F′* — задняя фокальная точка объектива; *H* и *H′* — соответственно передняя и задняя главные точки объектива (на схеме условно показаны совмещёнными)

ной зрачок объектива, преломляется линзами объектива. В пространстве изображений объектив формирует изображения объектов съёмки (на рис. 2.1 изображения *A′*, *B′*, *C′*).

Объектив строит изображение объекта съёмки с линейным увеличением β (в большинстве случаев, кроме макросъёмки, $\beta<1$, т. е. изображение меньше размеров объектов съёмки) и развёрнутым вокруг оптической оси объектива относительно объекта съёмки на 180°.

Если объект съёмки находится на расстоянии *a* от передней главной точки объектива*, то изображение этого объекта сформируется на расстоянии *a′* от задней фокальной точки объектива.

---

* В теории оптических систем [19, 26, 31] принято, что линейные отрезки считаются положительными, если их направление и направление распространения света совпадают, и — отрицательными, если эти отрезки направлены навстречу распространения света. Согласно теории оптических систем отрезки *a* и *x* отрицательные. Однако в кинотехнике оптические формулы применяются без учёта знаков линейных отрезков. В данной книге знаки отрезков не учитываются.

Линейное увеличение объектива определяется следующим образом:

$$\beta = \frac{l'}{l} = \frac{a'}{a}, \tag{2.1}$$

где l — поперечный размер объекта съёмки, l' — поперечный размер изображения объекта съёмки.

При съёмке одинаковых по размеру объектов, расположенных на разных расстояниях от объектива, размеры их изображений будут разными. Например, на рис. 2.1 размеры объектов съёмки B и C одинаковы, но изображение C' больше изображения B'.

Расстояния a и a' связаны формулой Гаусса (формулой в отрезках) [26]:

$$\frac{1}{a'} + \frac{1}{a} = \frac{1}{f'}, \tag{2.2}$$

где f' — фокусное расстояние киносъёмочного объектива.

Расположение объекта съёмки и его изображения относительно объектива можно описать с помощью расстояния x от передней фокальной точки объектива до объекта съёмки и расстояния x' от задней фокальной точки до изображения объекта съёмки.

Расстояния x и x' взаимосвязаны формулой Ньютона [26]:

$$xx' = ff'. \tag{2.3}$$

Если среда до и после объектива одинаковая (например, воздух), то $f = f'$ и формула Ньютона преобразуется к виду:

$$xx' = f'^2. \tag{2.4}$$

Из формулы (2.4) следует, что при съёмке объектов, расположенных на разных расстояниях x_i, объектив сформирует их изображения на разных расстояниях x'_i, где i — номер объекта съёмки (см. рис. 2.1). Изображения бесконечно удалённых объектов будут сформированы в задней фокальной плоскости объектива. Изображения остальных объектов формируются дальше задней фокальной плоскости, причём чем

ближе объект съёмки к объективу, тем дальше его изображение от объектива. Поскольку при проектировании объективов и проведении киносъёмки (кроме некоторых видов специальной киносъёмки) вводится ограничение $x_i \gg f$, то размеры отрезков x' небольшие по сравнению с фокусным расстоянием объектива.

Например, если съёмка выполняется объективом с фокусным расстоянием $f' = 50$ мм, а расстояние x до ближайшего объекта съёмки составляет, например, 500 мм, то для изображения этого объекта расстояние $x' = 5$ мм. Изображения остальных объектов съёмки, находящихся на расстоянии x от 500 мм до бесконечности, разместятся в небольшом объёме пространства изображений шириной всего 5 мм.

Таким образом, объектив формирует в пространстве изображений цветное, объёмное, изменяющееся во времени (при изменении яркости и пространственного положения объектов съёмки) изображение снимаемой сцены, т. е. преобразует реальное световое поле снимаемой сцены в пространстве объектов, воспринимаемое с одного ракурса, в виртуальное световое поле в пространстве изображений. При этом преобразованное световое поле оказывается перевёрнутым по двум пространственным координатам, перпендикулярным оптической оси объектива, трансформированным вдоль оптической оси объектива, уменьшенным в масштабе и изменённым, в результате воздействия объектива на световой поток из-за аберраций объектива и дифракции света.

Другими словами, киносъёмочный объектив формирует виртуальное преобразованное световое поле, характеризующее зависимость яркости элементарных участков объектов съёмки в их виртуальном изображении от пяти переменных: трёх пространственных координат, времени и длины волны света, как характеристики распределения света по спектру в каждой точке киноизображения. Одновременно объектив является оптическим фильтром пространственных частот сигналов киноизображения, поскольку изображения мелких объектов съёмки в оптическом изображении исчезают.

2.2. РАЗВЁРТКА И ДИСКРЕТИЗАЦИЯ КИНОИЗОБРАЖЕНИЯ

Ещё раз подчеркнём, что сформированное объективом оптическое изображение является виртуальным. Для обеспечения возможности дальнейшего преобразования и воспроизведения необходимо сформированное объективом киноизображение проявить (записать, зафиксировать). Однако записать сформированное объективом объёмное, цветное, изменяющееся во времени изображение, а затем воспроизвести его — технически очень сложно. Поэтому на практике запись изображения при киносъёмке производится в некотором узком объёме пространства изображений — в тонком светочувствительном слое киноплёнки или матрицы, располагаемом в пространстве изображений перпендикулярно оптической оси объектива. При этом записывается не мгновенная величина освещённости элементарных участков изображений объектов, а экспозиция, представляющая собой произведение усреднённой за время экспонирования освещённости на время экспонирования.

Необходимое и обязательное при киносъёмке совмещение оптического изображения, формируемого объективом, с пространственно непрерывной светочувствительной поверхностью называется развёрткой сигнала изображения по поверхности светочувствительного слоя. Например, при записи киноизображения на киноплёнку развёртка изображения выполняется по плоской поверхности киноплёнки, характеризуемой двумя пространственными координатами.

Таким способом можно записать изображение, зависящее только от двух пространственных координат, т. е. записать только один чёрно-белый кадр. Информация о цвете объектов съёмки, временны́х изменениях и объёме пространства пропадёт.

Итак, светочувствительный слой киноплёнки фиксирует только такое киноизображение, количество координат которого соответствует количеству координат светочувствительного приёмника. Поверхность киноплёнки имеет только

две пространственные координаты, именно поэтому она позволяет записать только один чёрно-белый кадр.

Для записи изображения, являющегося функцией большего количества координат, киноизображение необходимо предварительно преобразовать в последовательность отдельных изображений, каждое из которых имеет то количество координат, которое способен зарегистрировать приёмник изображения.

Преобразование непрерывной функции киноизображения в последовательность изображений, взятых через определённые интервалы по какой-либо координате, называется дискретизацией киноизображения по этой координате, а сами интервалы называются шагом дискретизации.

Например, в киноплёночной технологии при киносъёмке на киноплёнке записывается последовательность отдельных кадров, получаемых во времени с шагом дискретизации, равным периоду смены кадров

$$T_{\text{с}} = \frac{1}{\nu_{\text{с}}}, \tag{2.5}$$

где $\nu_{\text{с}}$ — частота киносъёмки.

Процесс преобразования непрерывного во времени сигнала киноизображения является дискретизацией изображения по времени.

Для записи на киноплёнке цветного киноизображения выполняется дискретизация изображения по длине волны записываемого видимого излучения. Это обеспечивается либо нанесением на киноплёнку нескольких светочувствительных слоёв, каждый из которых записывает свет, соответствующий части спектра видимого излучения, либо использованием цветоделённых чёрно-белых изображений.

Если киносъёмка выполняется цифровой кинокамерой, то дискретизация изображения осуществляется:

— по времени за счёт записи отдельных кадров, количество которых определяется частотой и длительностью киносъёмки;

— по двум пространственным координатам, поскольку поверхность светочувствительного слоя матрицы разбивается на отдельные пиксели;

— по длине волны путём использования трёх матриц, перед каждой из которых установлен соответствующий по спектру светофильтр, или размещением цветных фильтров перед каждым пикселем (фильтр Байера).

Проблемы передачи информации, связанные с третьей пространственной координатой, направленной вдоль оптической оси объектива, — глубиной пространства, требуют более подробного пояснения.

2.3. ПЕРЕДАЧА ГЛУБИНЫ ПРОСТРАНСТВА

Поскольку киноизображение записывается одним объективом с одного ракурса, то теряется информация о глубине пространства, фиксируемая с других ракурсов. В результате в киноизображении сохраняется только та информация о глубине пространства, которая фиксируется плоским, двухмерным изображением.

2.3.1. Как человек воспринимает глубину окружающего пространства

Человек в процессе восприятия и обработки зрительной информации, из-за особенностей своего зрительного аппарата, непрерывно переводит взор с одного рассматриваемого объекта (или его части) на другой объект. Изменяя направление взора, человек добивается, чтобы оптическая система глаза сформировала изображение объекта, наиболее интересного для человека в данный момент времени, в области фовеа на сетчатке глаза, т. е. в области наилучшего видения. Даже если человек внимательно рассматривает что-то в окружающем мире и ему в это время кажется, что его взор неподвижен, на самом деле и в это время взор совершает непрерывные микроперемещения (саккады, микросаккады, тремор).

Итак, человек непрерывно сканирует взором окружающее пространство, постоянно корректируя своё представление об окружающих объектах. При этом происходит не толь-

ко изменение направления зрительных осей глаз, но и изменение состояния аккомодации и конвергенции глаз.

Получаемую зрительную информацию мозг сопоставляет с ранее сформированными зрительными образами, с тем, что мы видели и восприняли раньше; в результате мозг выстраивает адекватное представление об окружающем человека пространстве, об объектах, расположенных вокруг него.

Человек — живое подвижное существо. Рассматривая что-либо, человек поворачивает голову или перемещается в пространстве, что позволяет оглядывать интересующий его объект с разных сторон и получать максимально достижимую информацию об этом объекте, в том числе о его форме, а также оценивать взаимное расположение объектов в пространстве.

Чем руководствуется мозг при оценке глубины пространства?

Для объектов, расположенных от наблюдателя на расстоянии, не превышающем радиус стереоскопического зрения, существенным средством оценки глубины пространства является бинокулярность восприятия зрительной информации. В этом случае восприятие глубины пространства связано с анализом мозгом различий изображений на сетчатках левого и правого глаза:

— геометрическая диспаратность (разность положения изображений точки объекта на сетчатках левого и правого глаза);

— временна́я диспаратность (изменения разности положения изображений точки объекта на сетчатках левого и правого глаза при перемещении объекта относительно человека);

— разное видение левым и правым глазом боковых поверхностей объектов.

Если у человека нет стереоскопического зрения, то и в этом случае он воспринимает глубину пространства, оценивая её по монокулярным признакам глубины пространства.

Основными монокулярными признаками глубины пространства являются:

— интерпозиция (окклюзия), т. е. частичное загораживание одних объектов другими, более близкими;

— законы геометрической перспективной трансформации, когда чем дальше находится объект, тем меньше его угловые размеры и, следовательно, тем меньше линейные размеры изображения объекта на сетчатке глаза (здесь не всё так просто: мозг не измеряет линейные размеры изображений, более того, человеку присуща константность восприятия формы и размеров объектов вопреки изменениям размеров изображений объектов на сетчатке и их геометрическим искажениям, вызванным законами геометрической оптики);

— градиент текстуры: по мере удаления объекта от человека текстура поверхности объекта начинает казаться более тонкой, элементы текстуры — более мелкими и более близкими друг к другу;

— относительный размер объектов: если человек знает, что размеры объектов одинаковы, то из них дальше тот, относительные видимые размеры которого меньше;

— параллакс движения, возникающий при относительном перемещении человека и объектов.

При этом мозг учитывает предыдущие зрительные представления, хранящиеся в памяти человека, а также учитывает напряжение аккомодационных мышц (если расстояние до объекта не превышает 5–6 метров) и мышц, обеспечивающих конвергенцию зрительных осей глаз (если расстояние до объекта не превышает примерно 500 метров).

Глубину пространства также помогают оценить резкость изображения объектов и элевация изображений:

— изображения разноудалённых объектов характеризуются разной резкостью;

— элевация это разное расстояние объектов относительно линии горизонта: чем дальше объекты (расположенные как ниже, так и выше линии горизонта), тем ближе они располагаются к линии горизонта.

Заметим, что для правильной оценки глубины пространства очень важна насыщенность пространства различными объектами, поскольку оценку удалённости объектов человек

производит не в абсолютных величинах, а в относительных. Действительно, представим себе, что в поле зрения находится только один объект. В этом случае достоверно ответить на вопросы: каковы размеры объекта и на каком расстоянии он находится, человек, исходя из зрительной информации, не может.

Для правильной оценки формы каждого объекта важно количество деталей поверхности объекта, характеризующихся разной яркостью или спектральным составом, в том числе изменения яркости различных участков поверхностей объектов: градиенты яркости, блики, рефлексы, авторефлексы, тени. Все они в совокупности создают сложную световую картину, которая позволяет человеку в подробностях оценивать форму объектов и взаимное положение этих объектов.

В качестве примера рассмотрим два объекта: шар и плоский круг, не загораживающие друг друга. Изображение каждого из этих объектов на сетчатке глаза будет в виде круга. Если освещённость всех точек каждого изображения объекта будет одинаковой, то мы воспринимаем данный объект как круг. Если освещённость изображения объекта меняется от какой-либо точки на поверхности объекта к периферии объекта, то этот объект мы зрительно воспринимаем как шар. Место нахождения наиболее яркой точки шара зависит от взаимного расположения источника света, шара и наблюдателя, а также от рассеивающих свойств поверхности шара.

Форму объектов легче воспринимать, если их поверхности имеют ярко выраженную текстуру. По сути, в этом случае мы воспринимаем объект состоящим из большого количества отдельных участков, каждый из которых воспринимается самостоятельно, и только их совокупность соединяется мозгом в единый образ.

Если объекты находятся на большом расстоянии от человека, то грубая оценка удалённости объектов относительно человека осуществляется только благодаря интерпозиции. Дополнительную информацию в этом случае дают признаки удалённости, обусловленные взаимодействием света с воз-

душной средой, через которую он проходит от объектов до человека:

— снижение контраста и чёткости изображений объектов из-за рассеивания света воздушной средой (воздушная перспектива);

— спектральная избирательность рассеивания света воздушной средой (голубая дымка далёких объектов, голубые дали).

2.3.2. Особенности восприятия изображения при просмотре кинофильмов

Кратко рассмотрим, как работает зрительная система человека, когда он смотрит кинофильм. В этом случае характерные особенности функционирования зрительной системы человека следующие:

— взор перемещается по поверхности плоского экрана, направляется на интересующие зрителя детали изображения;

— аккомодация и конвергенция практически не изменяются;

— движения зрителя и (или) его головы не дают новой информации о рассматриваемом киноизображении; эти движения вызваны усталостью из-за неподвижного положения тела, или вовлечённостью в сюжет, или желанием, как в реальном мире, оглядывать объекты с разных сторон, однако ожидаемых результатов это не приносит.

Такие же особенности восприятия отмечаются при рассматривании фотографий, картин, кинофильмов или при чтении книг.

Поскольку такой режим работы зрительного аппарата отличается от того, как работает зрительный аппарат человека, находящегося в природных условиях, то необходимо ограничивать время работы зрительного аппарата в таком режиме, особенно у детей, зрительный аппарат которых ещё не обучен так работать. С возрастом, постоянно имея дело с плоскими объектами (читая книги, просматривая телевизионные передачи, работая за компьютером или планшетом и т. д.), зрительная система человека привыкает (обучается)

Рис. 2.2. Картина А.И. Лактионова «Герой Советского Союза Юдин Н.В. в гостях у комсомольцев-танкистов»

функционировать в таком режиме, поэтому человек не ощущает усталости или дискомфорта даже при длительном чтении или увлечённости компьютерными играми. Однако в результате начинается постепенная, не замечаемая человеком, деградация зрительных функций.

Рассмотрим, благодаря чему зритель воспринимает глубину пространства в киноизображении.

Из перечисленных выше признаков глубины пространства в киноизображении сохраняются интерпозиция, геометрическая перспектива, градиент текстуры, относительные размеры и воздушная перспектива.

Действительно, глядя, например, на фотографию, приведённую на рис. 2.2 даже в чёрно-белом исполнении, никто не скажет, что изображение на фотографии плоское, ведь в восприятии смотрящего на фотографию посетители выставки (в правом углу) находятся на переднем плане, а картина, которую они рассматривают, расположена дальше. Но и содержание самой картины (и на приведённой фотографии в восприятии читателей, и непосредственно в музее в восприятии

посетителей выставки цветной картины) воспринимается объёмным, трёхмерным. Объёмность в картине передана перспективой, светом, тенями, окклюзией.

На рис. 2.3 приведена ещё одна фотография как пример передачи объёма и глубины пространства за счёт таких монокулярных признаков глубины пространства.

Рис. 2.3. Пример передачи объёма и глубины пространства в фотографии за счёт таких монокулярных признаков глубины пространства, как линейная перспектива, окклюзия и др.

Глубина пространства в фотографическом изображении записывается не только благодаря перспективе, но и в результате действия других монокулярных признаков глубины пространства, таких как:

— окклюзия, т. е. частичное загораживание одних объектов другими, более близкими;

— разное расстояние объектов относительно линии горизонта (элевация): чем дальше наземные объекты или объекты известного размера, находящиеся в воздухе, тем они ближе располагаются к линии горизонта.

При анализе глубины пространства в киноизображении возрастает значение таких признаков глубины пространства, как разная резкость объектов и элевация.

Поскольку в киноизображении основным признаком глубины пространства является линейная перспектива, рассмотрим её подробнее.

2.3.3. Линейная перспектива в кинематографе

Перспектива как наука возникла в глубокой древности, не позднее V века до н. э., в связи с необходимостью изображать на плоскости объекты, расположенные в трёхмерном

пространстве. Первоначально перспектива применялась в науке и живописи.

В настоящее время, в зависимости от области применения, термин «перспектива» имеет разные значения [29]:

— способ изображения объёмных предметов на плоскости (или какой-либо поверхности) в соответствии с тем кажущимся изменением их величины, очертаний, чёткости, которое обусловлено степенью отдалённости от точки наблюдения (в фотографии и кинематографе — от точки съёмки);

— вид вдаль, открывающийся с какого-либо места, видимое глазом пространство;

— то, что должно или может произойти, наступить вслед за настоящим, дальнейший ход каких-либо событий.

В рамках рассматриваемой темы принимаем, что термин «перспектива» имеет следующее значение: «перспектива (французское perspective, от латинского perspiceo — ясно вижу), система изображения объёмных тел на плоскости или какой-либо иной поверхности, учитывающая их пространственную структуру и удалённость отдельных их частей от наблюдателя» [28].

Фотографическое изображение это всегда линейная перспектива, поскольку при записи изображение формируется объективом на плоском светочувствительном слое, при этом масштаб изображения объектов съёмки уменьшается при удалении объектов съёмки от точки съёмки, а линии, параллельные в пространстве объектов съёмки, сходятся в записываемом изображении.

Наряду с линейной перспективой в фотографическом изображении глубину пространства передаёт и тональная перспектива, выражающаяся в снижении чёткости и ясности контуров, смягчении контрастов тонов и светотени, уменьшении насыщенности цветов, в более светлых дальних планах по сравнению с ближним планом. При больших расстояниях до объектов съёмки существенной становится разновидность тональной перспективы, называемая воздушной перспективой — снижение контраста и чёткости изображений объектов из-за рассеивания света воздушной средой, голубоватый цвет дальних объектов.

Отличие киноизображения от фотографии заключается в возможности записи изменений перспективы в результате взаимных перемещений киносъёмочного аппарата и снимаемых объектов во время киносъёмки. В результате в киноизображении фиксируется монокулярный признак глубины пространства — монокулярный параллакс движения. Например, если камера движется относительно неподвижных объектов киносъёмки, то объект, на который направлен объектив, воспринимается неподвижным, а видимое пространство воспринимается вращающимся вокруг этого объекта. При этом, объекты, расположенные за объектом, на который направлен объектив, смещаются в том же направлении, что и камера, а объекты, расположенные ближе объекта, на который направлена камера, — в противоположном направлении.

Однако этот фиксированный в киноизображении параллакс движения постоянен и никак не связан с движениями самого зрителя (как бы зритель ни двигался, восприятие объёмности киноизображения не улучшится).

Для описания перспективы в кинематографическом изображении используется термин «киноперспектива» (см., например, [11]), учитывающий наличие в киноизображении указанного монокулярного параллакса движения.

Для оценки глубины пространства очень важна насыщенность пространства объектами, так же как для оценки формы каждого объекта важно количество деталей на его поверхности, характеризующихся разной яркостью или разным спектральным составом отражённого или излучаемого света, поскольку оценку удалённости объектов человек в первую очередь производит не в абсолютных величинах, а в относительных, но потом приводит их к абсолютным. Действительно, представим себе, что в поле зрения находится только один объект. В этом случае, исходя из зрительной информации, человек не сможет достоверно ответить на вопросы: каковы размеры объекта и на каком расстоянии он находится. Человек может приблизительно ответить только на один из двух поставленных вопросов, и только в том случае, если ему известен ответ на другой вопрос, т. е. он сможет опреде-

лить расстояние до объекта, если ему известны размеры объекта, или определить размеры объекта по известному ему расстоянию до этого объекта.

Оценка взаимного расположения объектов относительно человека (дальше—ближе) существенно упрощается при увеличении количества объектов в окружающем пространстве, особенно если из-за их интерпозиции наблюдается окклюзия, т. е. частичное загораживание одних объектов другими, более близкими.

С другой стороны, количество объектов не должно быть слишком большим, а их расположение должно отвечать законам организации композиции кадра. Нужно упорядоченное расположение объектов съёмки, которое будет вести взгляд зрителя, а не бессмысленное их нагромождение. Только в этом случае зритель будет воспринимать глубину пространства в киноизображении.

Ещё одна проблема — это быстрая смена кадров в монтаже фильма, при которой у зрителя не остаётся достаточного времени, чтобы рассмотреть каждый кинокадр. В этом случае глубину пространства в киноизображении зритель просто не успевает воспринять.

Итак, зафиксированные в киноизображении монокулярные признаки глубины пространства [38, 46] позволяют зрителю по этим признакам выстраивать объёмное представление об объектах, присутствующих в киноизображении, и оценивать их удаление. Этих признаков достаточно для того, чтобы зритель воспринимал киноизображение трёхмерным.

2.3.4. Линейная перспектива при киносъёмке

Считается [25], что изображение, сформированное оптической системой глаза на сетчатке глаза, и киноизображение, созданное объективом при киносъёмке на светочувствительном слое киноплёнки или матрицы, построены по одинаковым законам линейной перспективы. При этом масштаб изображения каждого отдельно взятого объекта съёмки определяется следующей формулой [25]:

$$\frac{l'}{l}=\frac{f'}{a}, \tag{2.6}$$

где l — размер объекта съёмки, l' — размер изображения объекта съёмки, f' — заднее фокусное расстояние съёмочного объектива, a — расстояние от передней главной плоскости до объекта съёмки.

Из уравнения (2.6) следует, что масштаб изображения прямо пропорционален фокусному расстоянию объектива и обратно пропорционален расстоянию до объекта съёмки.

Учтём, что изображение объекта съёмки строится объективом на расстоянии a' от задней главной плоскости объектива, а не в задней фокальной плоскости, а также, что светочувствительный слой киноплёнки или матрицы располагается на расстоянии $a'_{\text{фок}}$, зависящем от расстояния съёмки $z_{\text{фок}}$, под которым будем понимать расстояние от изображения объекта съёмки, сформированного объективом, до самого объекта съёмки, на который производилась фокусировка съёмочного объектива. Тогда уточнённое значение масштаба изображения каждого отдельно взятого объекта съёмки определяется следующим образом [32, 38]:

$$\frac{l'}{l}=\frac{\frac{z_{\text{фок}}}{2}-\sqrt{\left(\frac{z_{\text{фок}}}{2}\right)^2-z_{\text{фок}}f'}}{\frac{z}{2}+\sqrt{\left(\frac{z}{2}\right)^2-zf'}}, \tag{2.7}$$

где z — расстояние съёмки объекта, масштаб изображения которого рассчитывается по формуле (2.7).

Уравнение (2.7) даёт более точное значение масштаба изображения объекта, что необходимо, например, при научной киносъёмке. В театральном кинематографе часто достаточна точность приближённой формулы (2.6), результаты расчётов по которой отличаются для подавляющего боль-

шинства сцен киносъёмки не более чем на несколько процентов от результатов расчётов по формуле (2.7).

Существует ещё одно отличие снимаемого киноизображения от воспринимаемого глазом оператора. Оно заключается в том, что фокусное расстояние объектива во время съёмки каждого кадра чаще всего постоянно и определяется исходя из пространства объектов снимаемой мизансцены и желаемого композиционного решения кинокадра. В то же время при рассматривании кинооператором объектов той же самой мизансцены фокусное расстояние глаз оператора всегда изменяется в результате аккомодации, в зависимости от того, на какой объект в данный момент времени направлен взор оператора, а следовательно, и масштаб сетчаточного изображения даже неподвижных относительно оператора объектов будет изменяться.

2.3.5. Линейная перспектива при кинопоказе

При кинопоказе одноракурсное киноизображение визуализируется на некотором расстоянии от зрителя — на расстоянии экрана от зрителя. В результате оптические системы глаз формируют на сетчатке левого глаза и сетчатке правого глаза одинаковые ретинальные изображения всех объектов кинокадра.

В реальной жизни, поскольку два глаза разнесены в пространстве, то на сетчатках глаз совпадают изображения только тех объектов, которые находятся на поверхности гороптера*. Все остальные сетчаточные изображения наблюдаемых объектов смещены относительно друг друга, причём смещены тем больше, чем дальше объекты от гороптера. Поэтому при демонстрации зрителю одноракурсного изображения монокулярные признаки глубины пространства, предос-

---

* Гороптер — геометрическое место точек, воспринимаемых без двоения при неподвижной точке фиксации взгляда и отображающихся на корреспондирующих точках сетчаток глаз. Корреспондирующие точки — пара точек, расположенных в серединах фовеа на сетчатках двух глаз, где отображается точка фиксации взгляда, и пары всех других точек с одинаковыми координатами относительно центральных точек [45].

тавляющие мозгу информацию о равном расстоянии до объектов, приходят в противоречие со стереоскопическими признаками глубины пространства, «говорящими», что расстояние до объектов одинаковое. В результате мозг хоть и выстраивает объёмное представление об удалённости каждого из объектов в таком изображении, но как бы сжато, не такое пространственно выраженное, как в реальной жизни.

К снижению пространственной выраженности киноизображения в восприятии зрителем приводит и уменьшение количества признаков глубины пространства, а также снижение диапазона и количества градаций яркости и спектра света в киноизображении.

Однако, несмотря на то что зафиксированных в киноизображении факторов глубины пространства меньше, чем в реальной действительности, но их достаточно для того, чтобы зритель воспринимал киноизображение трёхмерным. Особенность киноизображения заключается в том, что оно объёмное, но разворачивается только за поверхностью экрана, никаких выходов изображений объектов в предэкранное пространство, как в стереоизображениях, быть не может.

При показе кинофильма на экране в кинотеатре или на экране телевизора выполняется увеличение изображения, которое можно описать следующей зависимостью:

$$\frac{l_{\text{экр}}}{l'} = \frac{B_{\text{экр}}}{B_{\text{мат}}}, \tag{2.8}$$

где $l_{\text{экр}}$ — размер изображения объекта на экране, $B_{\text{экр}}$ — ширина кадра на экране, $B_{\text{мат}}$ — ширина кадра на киноплёнке или на матрице в киносъёмочном аппарате.

Из уравнений (2.6) и (2.8) получаем:

$$\frac{l_{\text{экр}}}{l} = \frac{f'}{a}\frac{B_{\text{экр}}}{B_{\text{мат}}}. \tag{2.9}$$

Из уравнения (2.9) следует, что при кинопроекции размеры изображений объектов увеличиваются одинаково, в

одинаковое количество раз, независимо от удалённости объектов относительно киносъёмочного аппарата при киносъёмке. Поэтому записанная при киносъёмке глубина пространства и возникшие при этом искажения глубины пространства при кинопроекции пропорционально увеличиваются для всех объектов, не внося дополнительных искажений.

Теперь рассмотрим восприятие зрителем глубины пространства в киноизображении в зависимости от места зрителя в кинозале.

Мозг зрителя, обрабатывая зрительную информацию, поступающую от киноизображения, сопоставляет её с предыдущим жизненным зрительным опытом и в результате выстраивает пространственное расположение наблюдаемых изображений объектов. Из этого можно предположить, что изображение объекта и сам объект будут зрителем восприниматься одинаково, если их угловые размеры сетчаточных изображений объектов будут одинаковы, т. е. если будет выполнено условие:

$$\frac{l_{\text{экр}}}{l_{\text{вид}}} = \frac{z_{\text{экр}}}{z_{\text{вид}}}, \tag{2.10}$$

где $z_{\text{вид}}$ — расстояние до реального объекта из памяти зрителя, при котором этот объект воспринимается с таким же угловым размером, как и изображение объекта на экране; $l_{\text{вид}}$ — размеры реального объекта из памяти зрителя; $z_{\text{экр}}$ — расстояние зрителя до экрана.

Тогда коэффициент $k_{\text{иск}}$ искажения глубины пространства в восприятии зрителя приблизительно равен

$$k_{\text{иск}} = \frac{z_{\text{вид}}}{z} = \frac{z_{\text{экр}}}{f'} \frac{B_{\text{мат}}}{B_{\text{экр}}}. \tag{2.11}$$

Анализируя уравнение (2.11), можно сделать следующие выводы:

1. Если $k_{\text{иск}} < 1,$ то глубина пространства в видимом киноизображении сжимается, а если $k_{\text{иск}} > 1,$ то — растягивается. Искажений глубины пространства при просмотре кинофильма не будет только в том случае, когда коэффициент $k_{\text{иск}} = 1.$ Например, в случае киносъёмки объективом с фокусным расстоянием 50 мм при ширине кадра 22 мм на матрице киноаппарата и ширине киноэкрана 6 м не увидит искажений глубины пространства в киноизображении только зритель, сидящий на расстоянии 13,6 м от экрана. Но даже этот зритель воспримет искажение глубины пространства, если начнётся показ кадров, снятых объективом с другим фокусным расстоянием.

2. Чем ближе зритель к экрану относительно расчётного по пункту 1, тем больше сжато киноизображение, и наоборот, чем дальше зритель от экрана, тем больше киноизображение растянуто.

3. Поскольку, с одной стороны, глубина пространства киноизображения в восприятии зрителей будет разная в зависимости от удалённости зрителя от экрана; а с другой — время демонстрации кинофильма для всех зрителей одинаково, то скорости движения объектов в восприятии зрителей, сидящих в креслах разных рядов в кинозале, также будут разными: для близко сидящих к экрану зрителей скорость замедляется, а для далеко сидящих зрителей — возрастает.

Полученные выводы хорошо согласуются с известными сведениями по перспективным соотношениям размеров изображений объектов в киноизображении [10].

Обобщая рассмотренный выше материал по линейной перспективе в кинематографе, можно заключить следующее:

1. Линейная перспектива в одноракурсном киноизображении является одним из основных факторов, формирующих условия восприятия зрителем глубины пространства в киноизображении.

2. Восприятие линейной перспективы организуется через создание композиционного пространственного расположения необходимого количества объектов съёмки.

3. Восприятие линейной перспективы киноизображения разное у зрителей, находящихся на разном расстоянии от экрана.

4. В одноракурсном киноизображении из-за противоречивости зрительной информации между монокулярными признаками глубины пространства, передаваемыми в том числе и линейной перспективой, и отсутствием стереоскопических признаков глубины пространства, зритель воспринимает киноизображение с плохо выраженной глубиной. В результате, несмотря на существенные искажения глубины пространства, определяемой линейной перспективой, воспринимаемой зрителями при кинопоказе, эти искажения не являются особенно заметными для зрителей.

5. Восприятие глубины пространства по признакам линейной перспективы существенно улучшится, если зритель будет смотреть кинофильм одним глазом и если создать условия, при которых в этот глаз зрителя будет попадать свет только от киноэкрана, при этом необходимо исключить попадание в поле зрения глаза света, отражаемого от предметов кинозала (стен, кресел, потолка и т. д.) и присутствующих в зале других зрителей. Либо надо переходить на технологии объёмного кинематографа, например, на известный стереоформат кинопоказа.

2.4. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ РЕЗКОСТИ В ИЗОБРАЖЕНИЯХ ОБЪЕКТОВ ПРИ КИНОСЪЁМКЕ

Резкость изображения снижается в результате аберраций объектива, дифракции света, светорассеяния в объективе и внутри кинокамеры.

Кроме того, использование для записи сформированного объективом объёмного изображения плоского светочувствительного слоя киноплёнки или матрицы приводит к тому, что изображения большинства объектов съёмки размываются дополнительно, причём по-разному для объектов, находящихся на разном расстоянии от кинокамеры.

Поэтому при киносъёмке оператор выполняет операцию наводки на резкость, т. е. смещает объектив вдоль оптической оси таким образом, чтобы совместить изображение сюжетно важного объекта съёмки со светочувствительным слоем жёстко закреплённой в киноаппарате матрицы или фильмового канала, фиксирующего пространственное расположение киноплёнки при её экспонировании. В результате изображение именно этого объекта будет наиболее резким.

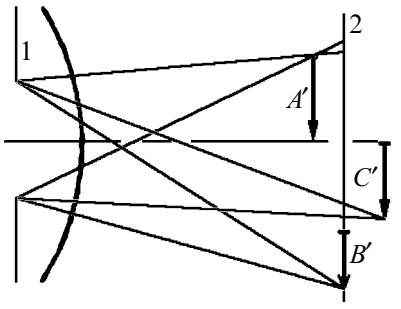


Рис. 2.4. Схема расположения светочувствительного слоя матрицы в пространстве изображений: 1 — выходной зрачок объектива, 2 — светочувствительный слой матрицы

Например, сфокусироваться на объект B (рис. 2.4) означает, что следует совместить плоскость изображения B' со светочувствительным слоем матрицы.

Поскольку изображения других объектов A' и C' находятся в других плоскостях, то в плоскости светочувствительного слоя изображения A' и C' окажутся размытыми, причём величина размытия будет зависеть от диаметра апертурной диафрагмы объектива и величины смещения изображений A' и C' относительно светочувствительного слоя матрицы (см. рис. 2.4). Более того, изображения A' и C' запишутся с искажением их поперечных размеров. Если изображение дальше плоскости светочувствительного слоя матрицы, то в записываемом кадре оно смещается к оптической оси, а если ближе — от оптической оси. При этом величина смещения тем больше, чем дальше изображение от оптической оси. Однако в силу малого размера глубины формирования изображений объектов киносъёмки эти искажения не превышают нескольких процентов и поэтому в театральном кинематографе зрителю не заметны.

В кинотехнике принято использовать значение расстояния z, измеряемое вдоль оптической оси объектива от плос-

кости светочувствительного слоя матрицы до объекта съёмки, на который фокусируется объектив. Если пренебречь расстоянием между передней и задней главными точками объектива, то

$$z = x + f + f' + x'. \tag{2.12}$$

Совместное решение уравнений (2.4) и (2.12) позволяет определить расстояние x':

$$x' = \frac{z - 2f'}{2} - \sqrt{\left(\frac{z - 2f'}{2}\right)^2 - f'^2}. \tag{2.13}$$

Аналогично из совместного решения уравнений (2.2) и (2.12) получаем:

$$a' = \frac{z}{2} - \sqrt{\left(\frac{z}{2}\right)^2 - l_c f'}. \tag{2.14}$$

Действительно, киносъёмочные объективы рассчитаны и спроектированы таким образом, что у каждого из них существует минимально допустимое расстояние $Z_{\text{мин}}$, т. е. ограничено расстояние, ближе которого объекты съёмки не должны находиться. Пусть это расстояние примерно равно $Z_{\text{мин}} = 10f'$. Тогда из уравнения (2.14) несложно получить, что изображения всех возможных объектов киносъёмки разместятся вдоль оси z внутри узкого диапазона от $a' = f'$ до $a' = 1{,}13f'$. При таком ограничении пространства размещения объектов съёмки относительно киноаппарата изображения всех объектов съёмки будут сформированы объективом вдоль оптической оси на следующих расстояниях от заднего фокуса:

— $0 \div 4{,}45$ мм при $f' = 35$ мм;

— $0 \div 6{,}35$ мм при $f' = 50$ мм;

— $0 \div 9{,}53$ мм при $f' = 75$ мм;

— $0 \div 12{,}7$ мм при $f' = 100$ мм.

2.5. СТРУКТУРА ИЗОБРАЖЕНИЯ, ФОРМИРУЕМОГО НА СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНОМ СЛОЕ МАТРИЦЫ

Матрица содержит набор светочувствительных элементов (пикселей), регулярно расположенных внутри матрицы. Архитектура пикселей в разных типах матриц разная. Но у всех типов матриц пространственная картина расположения пикселей в матрице всегда имеет регулярный характер. В качестве примера на рис. 2.5 приведена микрофотография светочувствительного слоя ПЗС-матрицы, светочувствительный слой которой представляет собой регулярную структуру из строк и столбцов, одинаковых по размерам пикселей, имеющих квадратную форму [8].

Из регулярности расположения пикселей в матрице следует, что всё пространство объектов киносъёмки разбивается на пространственные конусы, количество которых равно количеству пикселей в матрице.

Если считать систему цифровой записи киноизображения идеальной, то эти геометрические конусы не будут иметь искажений и не будут накладываться друг на друга. При этом свет от всех объектов, находящихся в пределах одного

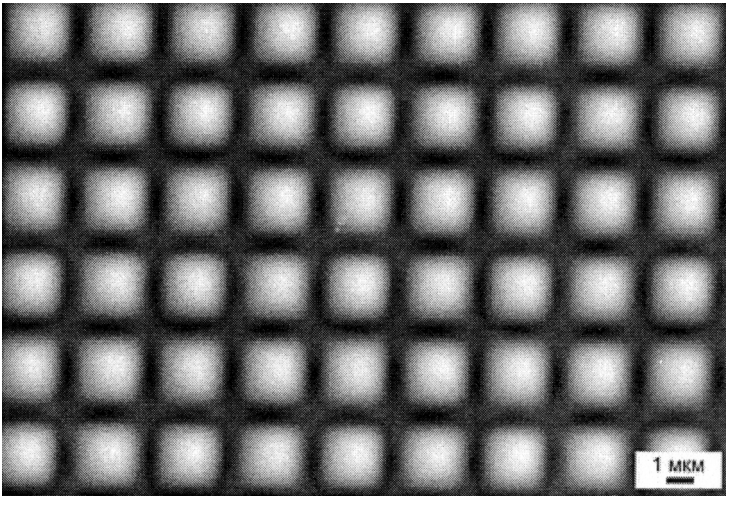


Рис. 2.5. Микрофотография светочувствительного слоя ПЗС-матрицы [8]

такого пространственного конуса, соберётся строго на одном пикселе матрицы.

Действующая освещённость в пределах площади каждого пикселя при записи каждого кадра интегрируется. Тем самым выполняется дискретизация сигнала изображения по двум пространственным координатам в плоскости светочувствительного слоя матрицы. В результате дискретизации изображения по двум пространственным координатам при записи сигнала киноизображения происходит интегрирование освещённости по поверхности каждого пикселя.

В случае идеальной оптической системы и идеальных условий киносъёмки свет, собирающийся объективом на поверхности пикселя, можно представить в виде световой пирамиды, основание которой — границы пикселя, а вершина — задняя узловая точка объектива [33, 35]. Если продолжить эту световую пирамиду в пространство объектов съёмки, то получаем, что свет от всех элементов объектов съёмки, находящихся в очерченном этой пирамидой пространстве, соберётся на данном пикселе матрицы и сформирует величину усреднённого по площади пикселя цифрового сигнала изображения, снимаемого с данного пикселя.

Количество пикселей в матрице определит количество световых пирамид, на которое условно разбивается пространство объектов съёмки.

Описываемая модель является упрощённой моделью и не учитывает искажения сигнала изображения, вызываемые средой, объективом, сдвигом изображения, матрицей. Учёт перечисленных факторов, воздействующих на световой сигнал, приводит к тому, что границы световых пирамид в пространстве объектов съёмки размываются.

Тем не менее, данная модель удобна для наглядного представления структуризации изображения и его искажений, особенно при стереосъёмке.

ВЫВОДЫ

Геометрическая оптика позволяет объяснить многие закономерности записи и воспроизведения киноизображений.

Однако лишь отдельные вопросы дискретизации в кинематографе и возможных искажений, возникающих в результате дискретизации, могут быть объяснены на базе геометрической оптики. К ним относятся:

— искажения, возникающие в результате перехода от объёмного изображения объектов съёмки в пространстве изображений к фиксации световых потоков плоскостью светочувствительного слоя приёмника изображений;

— искажения резкости изображений объектов съёмки, возникающие по той же причине;

— искажения, возникающие в результате дискретизации изображения по двум пространственным координатам матрицей при киносъёмке.

3. О ТЕОРИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛОВ В КИНЕМАТОГРАФЕ

В середине XX века были разработаны основы теории преобразования радиоэлектрических сигналов, успешно применяемые со времени её создания в практических задачах.

Теоретические и практические методы, разработанные в радиоэлектронике, оказались успешными и в оптике, когда оптические системы рассматриваются как пространственные фильтры, оцениваемые с помощью пространственных и пространственно-частотных характеристик.

Книги Д. Гудмена «Введение в Фурье-оптику» [18] и А. Папулиса «Теория систем и преобразований в оптике» [27] сыграли роль обобщённой системной основы теории преобразований сигналов в оптике; их издание, в том числе в переводе на русский язык в начале 1970-х годов, способствовало существенному продвижению исследований в этом направлении во всём мире. Дальнейшее развитие теории преобразований сигналов в оптике отражено в многочисленных научных работах, в том числе и отечественных авторов (см., например, [1, 12, 23, 30]).

Позже теоретические методы, разработанные в радиоэлектронике и оптике, стали проникать и в области кинематографии. «Это объясняется тем, что физические процессы, происходящие в радиоэлектронных приборах, близки процессам, осуществляемым в оптических, фотографических и кинематографических системах» [16]. Уже в конце 1970-х годов О.Ф. Гребенников заложил теоретические основы записи и воспроизведения изображений в кинематографе [16]. Дальней-

шее развитие теории преобразования сигналов в кинематографе связано с деятельностью научных школ О.Ф. Гребенникова, Н.К. Игнатьева и их последователей. Наиболее крупной монографией, обобщающей достигнутые результаты в этом направлении, стала книга О.Ф. Гребенникова и Г.В. Тихомировой, вышедшая в свет в 2002 году [17].

Приведём популярное, насколько это возможно, изложение теории преобразования сигналов в кинематографе без привлечения высшей математики в той части теории, которая необходима для понимания преобразований, происходящих в результате дискретизации сигналов в кинематографе, и возникающих искажений, причём в первую очередь рассмотрим сигналы киноизображений.

3.1. СИГНАЛ КИНОИЗОБРАЖЕНИЯ

Под сигналом киноизображения будем понимать световую информацию, излучаемую объектами съёмки, которая попадает во входной зрачок объектива, подвергается преобразованиям в процессе фильмопроизводства и затем формирует киноизображение при показе кинофильма зрителям, т. е. сигнал киноизображения несёт информацию о записываемом, преобразуемом и воспроизводимом киноизображении. При этом само киноизображение формируется и воспринимается человеком только при его воспроизведении с помощью средств визуализации на любом этапе фильмопроизводства, во всех остальных случаях оно остаётся (записывается, обрабатывается и хранится) как сигнал киноизображения.

Функция, описывающая сигнал киноизображения, может обозначать освещённость, яркость, экспозицию, коэффициент пропускания, интенсивность излучения, образующего изображение, и т. п.

Сигнал киноизображения, как показано в главе 1, в общем случае является функцией пяти переменных: трёх пространственных координат расположения элементарных участков поверхностей объектов съёмки, времени и спектрального состава светового потока, излучаемого или отражаемого элементарными участками поверхностей объектов съёмки.

В любой из существующих в настоящее время кинотехнологий сигнал изображения подвергается дискретизации по одному или нескольким параметрам. Так, в киноплёночной технологии фильмопроизводства дискретизация сигнала киноизображения производится по времени и длине волны видимого света. В цифровом фильмопроизводстве выполняется дискретизация сигнала киноизображения по четырём переменным: две пространственные координаты, время и длина волны видимого света.

3.2. ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛА КИНОИЗОБРАЖЕНИЯ

Сигналы киноизображения от объектов киносъёмки собираются киносъёмочным объективом и подвергаются преобразованиям. Математическая модель объектива представляет собой импульсную реакцию объектива, т. е. отклик объектива на отдельные бесконечно малые в пространстве импульсы, поступающие во входной зрачок объектива.

Если объектив считать линейным элементом, инвариантным к сдвигу входного импульса, то сигнал киноизображения, формируемый объективом, определяется свёрткой функций, описывающих входной сигнал и импульсную реакцию объектива.

Свёртка двух функций (в рассматриваемом примере входного сигнала киноизображения и импульсной реакции объектива) это интегральная операция над этими двумя функциями, в результате выполнения которой получается функция киноизображения, формируемого киносъёмочным объективом в пространстве изображений. В результате сигнал киноизображения на выходе объектива не является точной копией входного сигнала изображения. Он имеет несколько сглаженный вид из-за действия аберраций объектива, рассеяния света в объективе и дифракции света, что приводит к уменьшению чёткости и резкости воспроизводимого изображения. Воздействие объектива на сигнал киноизображения подобно воздействию линейного фильтра нижних частот на электрический сигнал.

Подобным же образом можно представить все элементы цепочки технологического процесса фильмопроизводства от киносъёмки до кинопоказа. Тогда каждый элемент технологического процесса будет описан своей импульсной реакцией, а итоговое выходное киноизображение будет рассчитываться при помощи интегралов свёртки входного сигнала киноизображения со всеми импульсными реакциями всех элементов технологического процесса фильмопроизводства.

Количество элементов, на которые разбивается технологический процесс, может быть любым. Например, киносъёмочный аппарат может быть представлен обобщённой импульсной реакцией киноаппарата, а может быть дополнительно разбит на отдельные звенья: киносъёмочный объектив, светочувствительный слой киноплёнки или матрицы, светорассеяние внутри камеры, сдвиг оптического изображения относительно светочувствительного слоя во время его экспонирования. В этом случае каждое из представленных звеньев характеризуется собственной импульсной реакцией, а обобщённая импульсная реакция киносъёмочного аппарата определяется свёрткой импульсных реакций всех элементов.

Сложность применения данной теории для студентов творческих вузов заключается в необходимости знаний основ интегрального исчисления, с которыми читатели с базовым гуманитарным образованием незнакомы.

3.3. ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КИНЕМАТОГРАФИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Входной сигнал киноизображения может быть представлен не только как совокупность отдельных импульсов, расположенных на предельно малых интервалах между ними, но и в виде набора гармоник, на которые можно разложить входной сигнал киноизображения. Если считать, что кинематографическая система линейна и инварианта к сдвигу, то найдя отклики системы на эти гармонические составляющие и перемножив их, а также умножив на набор гармоник входного сигнала, получим спектр выходного сигнала киноизображения.

Совокупность всех гармоник входного сигнала киноизображения по каждой из координат называется спектром входного сигнала по этой координате.

Спектр входного сигнала определяется преобразованием Фурье, представляющим собой интеграл, в общем случае преобразующий входной сигнал в совокупность комплексных экспонент. Если функция входного сигнала чётная, то экспоненциальное преобразование Фурье вырождается в косинус-преобразование, т. е. спектр будет состоять из совокупности косинусоид, а если функция входного сигнала нечётная — то в синус-преобразование (спектр будет состоять из совокупности синусоид).

Обратное преобразование Фурье функции, описывающей спектр входного сигнала киноизображения, позволяет от спектра перейти к самой функции входного сигнала.

Аналогичным образом связаны функция выходного сигнала киноизображения и её спектр, а также любой промежуточный сигнал киноизображения и соответствующий ему спектр.

Если применить преобразование Фурье к импульсной реакции кинематографической системы фильмопроизводства, то получим частотную характеристику кинематографической системы. В этом случае спектр выходного сигнала киноизображения будет равен простому перемножению спектра входного сигнала киноизображения на частотную характеристику кинематографической системы и не нужны знания интегрального исчисления.

Как и в разделе 3.2, цепочку технологического процесса фильмопроизводства можно разбить на отдельные элементы и описать каждый из них собственной частотной характеристикой (её можно рассчитать с помощью преобразования Фурье импульсной реакции этого элемента или получить экспериментально). Тогда, например, частотную характеристику киносъёмочного аппарата легко получить обычным перемножением частотных характеристик отдельных элементов киноаппарата, непосредственно влияющих на проходящий сигнал киноизображения.

Если кинематографическая система линейна и инвариантна к сдвигу, то импульсную реакцию системы и её звеньев выражают действительные чётные функции, а преобразование Фурье таких функций даёт чётные действительные частотные характеристики.

Каждая гармоника спектра такого сигнала описывается гармонической функцией, т. е. имеет периодический характер и изменяется по закону:

$$y(x) = A\sin(2\pi\nu x + \varphi), \tag{3.1}$$

где A — амплитуда, характеризующая размах колебаний, $\pi = 3{,}14159$ — константа, ν — частота колебаний, x — координата, по которой происходят колебания, φ — фаза колебаний.

Периодическое колебание характеризуется не только частотой колебаний ν, но и периодом колебаний T, вычисляемого по формуле (1.3) и равного отрезку на оси абсцисс системы координат (это может быть время или пространственная координата), на который приходится один полный цикл колебания.

Рассматриваемая функция $y(x)$ обладает свойством периодичности, т. е. при сдвиге на период T функция начинает повторять те же значения, которые были у неё в начале системы координат.

Если сигнал киноизображения является периодической функцией, т. е. характеризуется некоторой частотой колебаний, то его спектр будет содержать гармоники, частоты которых кратны частоте колебаний сигнала. Причём частота первой гармоники совпадает с частотой колебаний самого сигнала. Амплитуды гармоник убывают при увеличении частоты (или номера) гармоники.

На рис. 3.1 в качестве примера приведён график пилообразного колебания. Спектр этого сигнала состоит из пяти гармоник: $\sin(2\pi 1x)$, $0{,}5\sin(2\pi 2x)$, $0{,}33\sin(2\pi 3x)$, $0{,}25\sin(2\pi 4x)$, $0{,}2\sin(2\pi 5x)$ (рис. 3.2). В данном случае все гармоники имеют одинаковую фазу, причём если фаза во всех гармониках из-

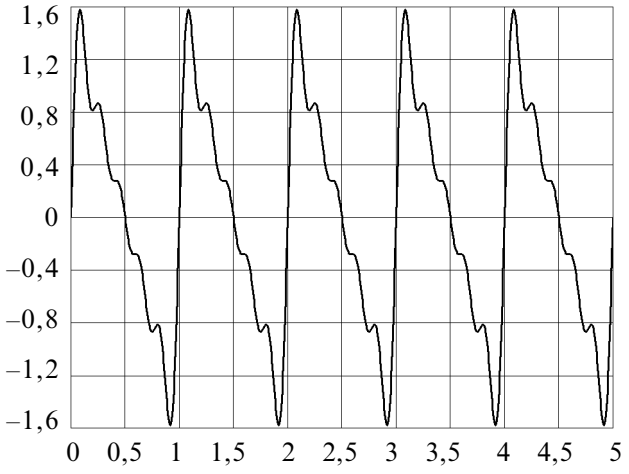


Рис. 3.1. Пример пилообразного сигнала, спектр которого содержит 5 гармоник

менится, например, на 180°, то это приведёт к «повороту» пилообразного сигнала (рис. 3.3). Частоты колебаний гармоник равны ν, 2ν, 3ν, 4ν, ... , $n\nu$, где n — номер гармоники. Амплитуды рассматриваемых гармоник пропорциональны номеру гармоники:

$$A_n = \frac{1}{n}. \qquad (3.2)$$

Из формулы (3.2) следует, что амплитуды гармоник убывают пропорционально номеру гармоники, поэтому с ростом номера гармоники вносят всё меньший вклад в формирование суммарного колебания. Однако получаемое приближение к требуемой форме колебаний будет тем лучше, чем больше гармоник используется. Сравните график пилообразного сигнала, спектр которого состоит из 15 гармоник (рис. 3.4), с графиком такого же сигнала, содержащим только 5 гармоник (см. рис. 3.1).

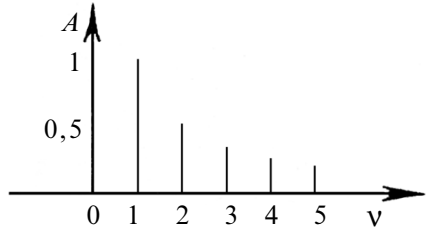


Рис. 3.2. Спектр пилообразного сигнала, состоящего из 5 гармоник

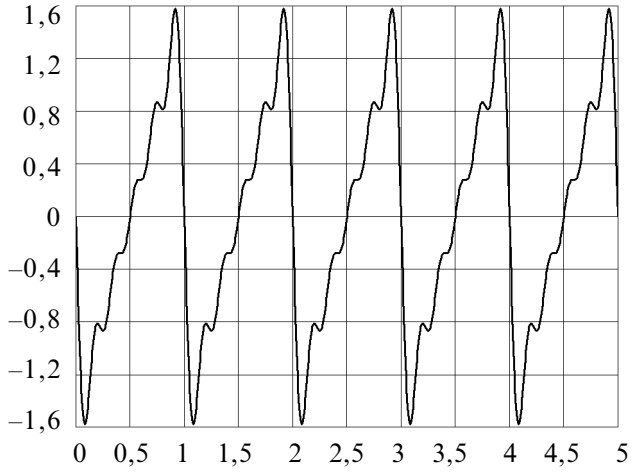


Рис. 3.3. Пример пилообразного сигнала, спектр которого содержит 5 гармоник, смещённых по фазе на 180º относительно варианта, приведённого на рис. 3.1

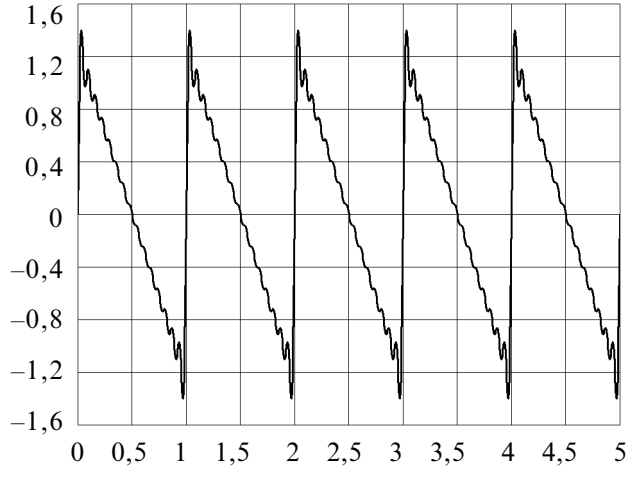


Рис. 3.4. Пример пилообразного сигнала, спектр которого содержит 15 гармоник

Надеемся, что применение частотных характеристик поможет гуманитариям без привлечения высшей математики разобраться с отдельными вопросами теории преобразования сигналов киноизображений.

3.4. ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛА КИНОИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИ ЕГО ДИСКРЕТИЗАЦИИ

Из теории записи и воспроизведения киноизображений [16, 17, 20] следует, что в результате дискретизации в спектральном пространстве кроме спектра исходного сигнала появляется бесконечное множество смещённых спектров, которые полностью повторяют спектр исходного сигнала и отстоят от него на интервалах $\pm\nu_д$, $\pm 2\nu_д$, $\pm 3\nu_д$, ..., $\pm n\nu_д$, ..., где $\nu_д$ — частота дискретизации. Эти смещённые спектры искажают сигнал, полученный в результате его дискретизации.

В качестве примера рассмотрим, как изменится спектр пилообразного сигнала, приведённого на рис. 3.1, после дискретизации этого сигнала с частотой дискретизации 11 Гц. Исходный спектр содержал гармоники с частотами 1, 2, 3, 4 и 5 Гц (см. рис. 3.2). Спектр сигнала после его дискретизации содержит частоты 1, 2, 3, 4, 5, 12, 13, 14, 15, 16, 23, 24, 25, 26, 27 Гц и т. д., а также в спектре сигнала появились отрицательные частоты –6, –7, –8, –9, –10, – 17, –18, –19, –20, –21 Гц и т. д. (рис. 3.5).

Если предположить, что перед или при воспроизведении сигнала будут отфильтрованы частоты, превышающие по абсолютной величине, например, 22 Гц, т. е. в спектре сигнала останутся частоты –21, –20, –19, –18, –17, –10, –9, –8, –7, –6, 1, 2, 3, 4, 5, 12, 13, 14, 15, 16 Гц, то сигнал будет иметь вид, представленный на рис. 3.6. Этот сигнал существенно

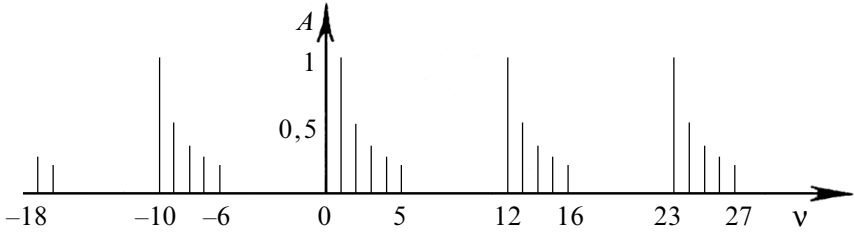


Рис. 3.5. Спектр приведённого на рис. 3.1 пилообразного сигнала, исходно состоящего из 5 гармоник, после дискретизации сигнала с частотой 11 Гц

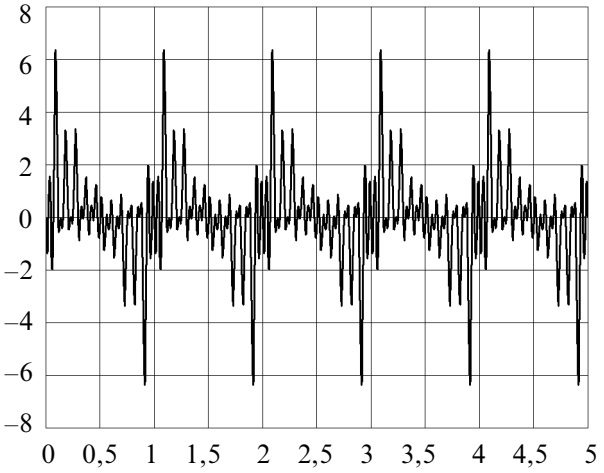


Рис. 3.6. Пилообразный сигнал, взятый из рис. 3.1, после его дискретизации с частотой дискретизации 11 Гц и отфильтровывания частот, превышающих по абсолютной величине 22 Гц

отличается от сигнала до его дискретизации (сравни рис 3.6 с рис. 3.1).

Поскольку основная часть спектра сигнала, подвергнутого дискретизации, в точности повторяет спектр исходного сигнала, то для восстановления сигнала после дискретизации достаточно полностью подавить все смещённые спектры. Для этого при восстановлении сигнала, предварительно подвергнутого дискретизации с частотой дискретизации $\nu_д = 11$ Гц, в рассматриваемом примере необходимо применить фильтр низких частот (рис. 3.7) с частотой среза 5,5 Гц. В результате действия идеального фильтра будет восстановлен неискажённый спектр исходного сигнала, а следовательно, и сам сигнал.

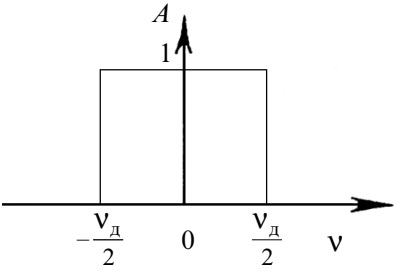


Рис. 3.7. Частотная характеристика идеального фильтра для дискретного сигнала, полученного из непрерывного дискретизацией с частотой дискретизации $\nu_д$

Но это возможно только в том случае, когда выполнены три условия. Во-первых, спектр исходного сигнала ограничен, т. е. когда в спектре исходного сигнала существует максимальная частота ν_{max}.

Вторым условием является правильный выбор частоты дискретизации $\nu_д$, которая должна быть как минимум в два раза больше максимальной частоты ν_{max} спектра исходного непрерывного сигнала:

$$\nu_д \geq 2\nu_{max}. \qquad (3.3)$$

Это требование соответствует широко известной теореме В.А. Котельникова*: любую функцию, состоящую из частот от 0 до ν_{max}, можно непрерывно передавать с любой точностью при помощи чисел, следующих друг за другом через интервалы $T = \frac{1}{2\nu_{max}}$ [22].

В отечественных публикациях теорема отсчётов названа именем Котельникова. В зарубежных источниках теорему Котельникова используют очень часто, поскольку эта теорема является теоретической основой перевода исходно непрерывных сигналов (изображение, звук и т. д.) в цифровой формат, но называют её теоремой отсчётов, теоремой Шеннона, теоремой Найквиста или теоремой Найквиста—Шеннона.

---

* Котельников Владимир Александрович (24 августа (6 сентября) 1908 года — 11 февраля 2005 года) — советский и российский учёный в области радиофизики, радиотехники, электроники, информатики, радиоастрономии, криптографии. Один из основоположников советской секретной радио- и телефонной связи. Академик Академии наук СССР, академик Российской Академии наук, вице-президент Академии наук СССР.

Крупнейшие научные достижения В.А. Котельникова, оказавшие существенное влияние на развитие мировой науки:

— создание в 1933 году теоремы отсчётов;

— создание теории потенциальной помехоустойчивости;

— разработка планетарных радиолокаторов;

— пионерские исследования в области радиолокационной астрономии.

Поскольку на практике спектр разных сигналов разный, а частота дискретизации в технике не перестраивается под каждый конкретный сигнал, согласно частотному диапазону спектра этого сигнала, а определяется с учётом других технических или технологических ограничений (достижимая скорость передачи данных, имеющийся объём памяти и т. д.), то до процесса дискретизации сигнал необходимо пропустить через фильтр низких частот, который отсечёт все частоты, превышающие половину частоты дискретизации. А если этот фильтр будет не идеальный, то в реальной частотной характеристике фильтра всегда будет присутствовать некоторая область частот, в пределах которой частотная характеристика снижается от 1 до 0. Поэтому частота дискретизации должна выбираться с учётом частотной характеристики входного фильтра.

Третьим условием является обязательное применение фильтра низких частот при воспроизведении дискретных сигналов, который отсекает все смещённые спектры, появившиеся в результате дискретизации сигнала.

3.5. ИСКАЖЕНИЯ СИГНАЛА КИНОИЗОБРАЖЕНИЯ, ВЫЗВАННЫЕ ЕГО ДИСКРЕТИЗАЦИЕЙ

Анализ искажений, вызванных дискретизацией сигнала киноизображения, удобно проводить в спектральном пространстве.

Обычно выделяют два вида искажений.

К искажениям первого рода относятся такие искажения, которые возникают, если частота дискретизации не соответствует требованиям теоремы Котельникова. В этом случае смещённые спектры сигнала, появившиеся в результате дискретизации сигнала, частично накладываются друг на друга и на основной спектр и не могут быть убраны фильтром.

В примере, рассмотренном в разделах 3.3 и 3.4, выполним дискретизацию с частотой 9 Гц (согласно теореме Котельникова частота дискретизации в данном примере должна быть не менее 10 Гц). Тогда к частотам основного спектра 1, 2, 3, 4 и 5 Гц добавятся частоты ложных спектров: –8, –7,

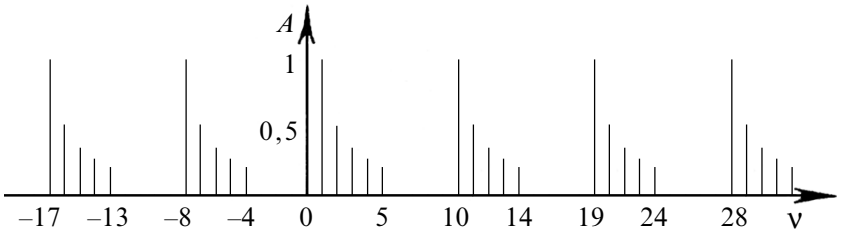


Рис. 3.8. Спектр приведённого на рис. 3.1 пилообразного сигнала, исходно состоящего из 5 гармоник, после дискретизации сигнала с частотой 9 Гц

–6, –5, –4, 10, 11, 12, 13, 14 Гц и т. д. (рис. 3.8). Выбрать частотные характеристики фильтра из рекомендаций, что он должен сохранить частоты основного спектра и отсечь все частоты, превышающие половину частоты дискретизации, не представляется возможным. В качестве компромисса выберем граничную частоту спектра, пропускаемую фильтром, 5 Гц. Тогда в спектре выходного сигнала останутся следующие частоты: –5, –4, 1, 2, 3, 4, 5 Гц. Сигнал, имеющий такой спектр, показан на рис. 3.9, он очевидным образом отличается от сигнала, приведённого на рис. 3.1, добавлением низких частот, которых не было в исходном сигнале.

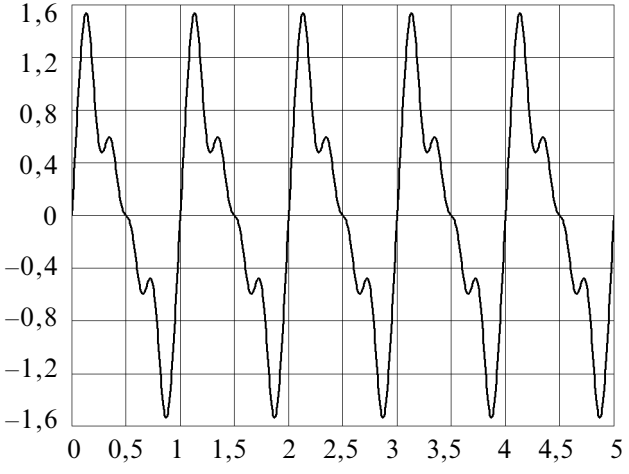


Рис. 3.9. Пилообразный сигнал, взятый из рис. 3.1, после его дискретизации с частотой дискретизации 9 Гц и фильтровывания частот, превышающих по абсолютной величине 5 Гц

Упростим пример сигналом, имеющим одну единственную гармонику на частоте 8 Гц при дискретизации с частотой 10 Гц. Тогда в спектре дискретного сигнала будут частоты 8 Гц и другие, сдвинутые относительно 8 Гц кратно 10 Гц, т. е. наименьшими частотами в спектре дискретного сигнала будут –12, –2, 8, 18 Гц. Выбрав частотную характеристику спектра сигнала, согласно вышеприведённым рекомендациям, получаем, что частота среза фильтра должна быть 5 Гц. Тогда спектр выходного сигнала будет содержать одну единственную частоту 2 Гц вместо 8 Гц в исходном сигнале, что и является яркой иллюстрацией искажений первого рода.

К искажениям второго рода относятся искажения, возникающие, когда частота дискретизации выбрана правильно, в соответствии с теоремой Котельникова, но частота среза фильтра превышает половину частоты дискретизации. В этом случае кроме частот основного спектра фильтр пропустит более высокие частоты ложных спектров.

Для пояснения возникновения искажений второго рода обратимся к рис. 3.5. Сигнал, спектр которого приведён на рис. 3.5, состоит из частот 1, 2, 3, 4 и 5 Гц. Выбранная частота дискретизации 11 Гц более чем в два раза превышает максимальную частоту спектра сигнала, равную 5 Гц, что соответствует требованиям теоремы Котельникова. Ближайшие частоты ложных спектров: –6 Гц и 16 Гц. Если частота среза фильтра будет превышать рекомендуемую величину в 11/2=5,5 Гц и составит, например, 6,5 Гц, то такой фильтр кроме частот исходного сигнала пропустит ещё одну ложную частоту, равную –6 Гц, что и приведёт к искажению восстановленного после дискретизации сигнала.

Кроме искажений первого и второго рода возможно возникновение искажений, вносимых фильтром, если частотная характеристика фильтра имеет не прямоугольную форму. В этом случае амплитуды гармоник будут изменяться непропорционально исходным амплитудам, а это приведёт к изменению восстановленного сигнала относительно входного.

ВЫВОДЫ

Анализ искажений, вызванных дискретизацией сигнала киноизображения, удобно проводить в спектральном пространстве с привлечением частотных характеристик.

Искажений в выходном сигнале не будет, если обеспечено выполнение следующих условий.

1. Спектр исходного сигнала должен быть ограниченным, т. е. частоты гармоник исходного сигнала должны быть в ограниченном диапазоне от 0 до ν_{max}.

2. Частота дискретизации как минимум в два раза должна превышать максимальную частоту спектра сигнала (теорема Котельникова).

3. Если не выполняются требования теоремы Котельникова, то до дискретизации сигнал необходимо пропустить через входной фильтр низкой частоты, у которого частота среза равна половине частоты дискретизации.

4. До или во время восстановления дискретный сигнал должен быть пропущен через выходной фильтр низких частот с частотой среза, равной половине частоты дискретизации

5. Входной и выходной фильтры низких частот должны иметь прямоугольную или максимально приближенную к прямоугольной частотную характеристику.

4. ВРЕМЕННЫ́Е ИСКАЖЕНИЯ КИНОИЗОБРАЖЕНИЯ

Выполним анализ временны́х искажений первого рода, возникающих при киносъёмке.

Дискретизация киноизображения по времени в театральном кинематографе производится всегда. Так было во время рождения кинематографа, так работает технология фильмопроизводства и сейчас. Дискретизация киноизображения по времени достигается за счёт записи последовательности кадров через интервалы времени, равные периоду смены кадров $T_{\text{с}}$.

Частотой временно́й дискретизации является частота киносъёмки

$$\nu_{\text{д}} = \nu_{\text{с}} = \frac{1}{T_{\text{с}}}, \tag{4.1}$$

В плёночном киносъёмочном аппарате дискретизация киноизображения по времени происходит в фильмовом канале за счёт записи серии отдельных кадров. При этом в течение времени экспонирования $t_{\text{экс}}$ каждого кадра киноплёнка неподвижна в кадровом окне фильмового канала, а обтюратор пропускает световой поток от киносъёмочного объектива в кадровое окно на светочувствительный слой киноплёнки. Затем обтюратор перекрывает световой поток, направляемый объективом в кадровое окно, и в это время грейферный механизм перемещает киноплёнку на шаг кадра. После чего выполняется экспонирование следующего кадра.

Время экспонирования кадра определяется углом раскрытия α_o обтюратора и частотой ν_c киносъёмки:

$$t_{\text{экс}} = \frac{\alpha_o}{\nu_c \cdot 360}. \tag{4.2}$$

За время $t_{\text{экс}}$ происходит усреднение освещённости в каждом элементарном участке кадра, т. е. время $t_{\text{экс}}$, задаваемое обтюратором, совместно с киноплёнкой, фиксирующей количество света, попадающего за время экспонирования на каждый элементарный участок кадра, выполняют роль временно́го фильтра, сглаживающего временны́е изменения освещённости этого участка кадра. Чем больше время экспонирования, тем сильнее сглаживаются временны́е изменения сигнала киноизображения.

Изменения освещённости во времени для каждого элементарного участка кадра являются входным сигналом киноизображения для киноплёнки, а характеристика обтюрации киносъёмочного аппарата — импульсной временно́й реакцией. Характеристика обтюрации киносъёмочного аппарата представляет собой зависимость освещённости от времени в точке кадра киноизображения равномерно светящейся элементарной площадки в течение экспонирования кадра, именно характеристика обтюрации описывает импульсную реакцию обтюратора как фильтра временны́х частот.

Как показывают расчёты [14, 39–42], в общем случае характеристика обтюрации различна для разных точек кадра, и даже длительности открытия и закрытия светового потока обтюратором для внеосевых точек кадра отличаются

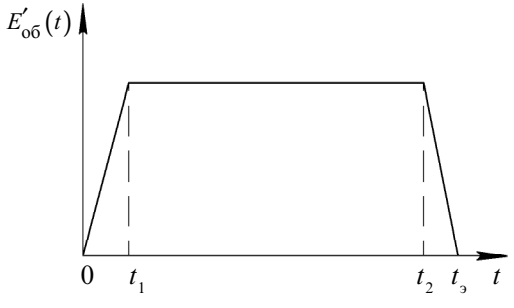


Рис. 4.1. Характеристика обтюрации $E'_{\text{об}}(t)$ киносъёмочного аппарата

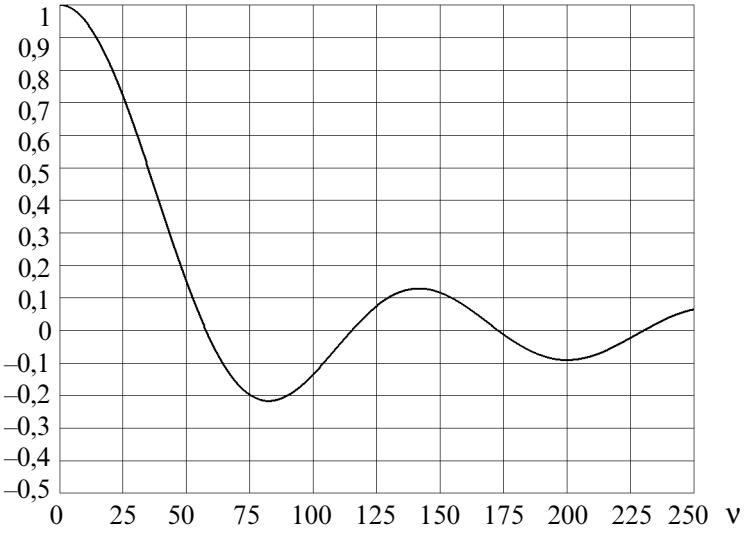


Рис. 4.2. Временна́я частотная характеристика киносъёмочного аппарата с прямоугольной характеристикой обтюрации и углом раскрытия обтюратора 150º

друг от друга из-за наличия толщины у края рабочей лопасти обтюратора.

В подавляющем большинстве конструкций киносъёмочных аппаратов характеристика обтюрации имеет трапециидальную форму (рис. 4.1). Однако, рассматривая без привлечения высшей математики искажения, вызываемые дискретизацией, допустимо форму характеристики обтюрации считать прямоугольной. В этом случае частотная характеристика временно́го фильтра киносъёмочного аппарата, называемая временно́й частотной характеристикой, будет иметь вид, приведённый на рис. 4.2.

Временна́я частотная характеристика является функцией от временны́х частот ν, измеряемых в Герцах.

Временна́я частотная характеристика обтюратора при прямоугольной характеристике обтюрации равна нулю, когда частоты

$$\nu_0 = \frac{n}{t_{\text{экс}}}, \tag{4.3}$$

где n — целые числа: 1, 2, 3...

Таким образом, временна́я частотная характеристика киносъёмочного аппарата подавляет частоты ν_0.

В цифровом киносъёмочном аппарате дискретизация киноизображения по времени происходит аналогично за счёт записи матрицей серии отдельных кадров. Функцию обтюратора выполняет электронный затвор, характеристика обтюрации которого имеет прямоугольную форму; следовательно, временна́я частотная характеристика цифрового киносъёмочного аппарата аналогична временно́й частотной характеристике плёночного киноаппарата.

4.1. НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ЯРКОСТИ ОБЪЕКТОВ КИНОСЪЁМКИ

Если во время киносъёмки какой-то объект съёмки периодически изменяет свою яркость с частотой $\nu_{об}$, то согласно теореме Котельникова временны́х искажений не возникнет, если $\nu_{об}$ меньше половины частоты киносъёмки, т. е. при частоте киносъёмки 24 кадр/с временны́е искажения наблюдаться не будут, если частота колебаний яркости объекта съёмки меньше 12 Гц.

Если же требования теоремы Котельникова не выполняются, то в спектре дискретного сигнала появятся низкочастотные ложные составляющие. Например, пусть частота киносъёмки стандартная: 24 кадр/с, а частота колебания яркости объекта составляет 19 Гц. Тогда в результате дискретизации сигнала киноизображения по времени минимальная временна́я частота будет равна $19-24=-5$ Гц. Поскольку для временны́х колебаний отрицательный знак частоты означает только то, что фаза колебаний изменяется на 180°, а человеческий глаз не воспринимает фазу временны́х колебаний яркости, то знаком «–» можно пренебречь. Получается, что в дискретном сигнале появится ложная частота колебаний яркости объекта съёмки, равная 5 Гц, которой не было в реальных объектах съёмки. Такое искажение временно́го сигнала называется стробоскопическим эффектом.

При этом амплитуда колебаний яркости в киноизображении уменьшится, поскольку временна́я частотная характеристика для всех частот меньше 1 (см. рис. 4.2).

Поскольку временна́я частотная характеристика в рассматриваемом случае описывается зависимостью:

$$K(\nu)=\frac{\sin(\pi\nu t_{\text{экс}})}{\pi\nu t_{\text{экс}}}=\frac{\sin\left(\frac{\pi\nu t_{\text{экс}}}{\nu_c\cdot 360}\right)}{\frac{\pi\nu t_{\text{экс}}}{\nu_c\cdot 360}}, \qquad (4.4)$$

то амплитуда колебаний яркости изображения объекта киносъёмки при $\alpha_o=150°$ уменьшится в 0,83 раза.

Предположим, что частота колебаний яркости объекта съёмки составляет 67 Гц. Глаз человека такие колебания не видит, поскольку они превышают критическую частоту восприятия мельканий человеком, составляющую 48–50 Гц. При киносъёмке с частотой 24 кадр/с производится дискретизация сигнала киноизображения по времени, в результате в спектре дискретного сигнала возникают ложные частоты 43, 19, –5, –29 Гц и другие, минимальная из которых равна $67-3\cdot 24=-5$ Гц, как и в предыдущем примере. Однако при тех же условиях киносъёмки амплитуда колебаний яркости изображения такого объекта киносъёмки уменьшится, согласно формуле (4.4), в 7,5 раза.

Если же частота колебаний яркости объекта съёмки составляет, например, 115 Гц, то минимальная ложная частота снова составит 5 Гц, но амплитуда колебаний яркости изображения этого объекта киносъёмки уменьшится в 600 раз. Поэтому колебания яркости изображения этого объекта съёмки восприниматься зрителем, скорее всего, не будут.

4.2. БЕЗИНЕРЦИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА

Пусть для освещения объектов съёмки применены широко используемые в быту безинерционные источники света, например металлогалогенные лампы, запитываемые в большинстве европейских стран, в том числе и в России, от бытовой электрической сети переменного тока 220 В с ча-

стотой 50 Гц. Тогда световой поток, излучаемый металлогалогенными лампами, будет пульсировать с частотой, вдвое превышающей частоту тока, т. е. лампа вспыхивает с частотой 100 Гц. Этих колебаний света человек не видит из-за инерции зрения.

Однако если произвести киносъёмку данной съёмочной площадки киноаппаратом с частотой съёмки 24 кадр/с, то в результате дискретизации киноизображения по времени в дискретном киноизображении кроме исходной частоты 100 Гц появятся ложные частоты, сдвинутые относительно частоты 100 Гц на кратные значения частоты киносъёмки: 76, 52, 28, 4, –20, –44 Гц и т. д. Таким образом, в результате дискретизации киноизображения по времени возникают искажения первого рода. При просмотре полученного киноизображения мы увидим заметную пульсацию яркости, происходящую с хорошо воспринимаемой глазом человека частотой 4 Гц. При этом амплитуда колебаний яркости в киноизображении, полученном при киносъёмке киноаппаратом с углом раскрытия обтюратора $\alpha_o = 150°$, согласно формуле (4.4), уменьшится более, чем в 7 раз, но всё равно останется недопустимо большой, заметной зрителю, воспринимаемой им как дефект киноизображения.

Устранить этот дефект можно двумя способами.

1. Обратим внимание, что временна́я частотная характеристика киноаппарата (см. например, рис. 4.2) равна нулю при частотах, определяемых формулой (4.3).

Подставляя (4.2) в (4.3), получаем

$$\nu_0 = \frac{n\nu_c \cdot 360}{\alpha_o}. \qquad (4.5)$$

Для устранения мельканий света от безинерционных ламп нужно создать такую временну́ю частотную характеристику, которая подавляет частоту $\nu_л$ мельканий яркости лампы, т. е. необходимо приравнять $\nu_л = \nu_0$. В результате получаем, что при угле раскрытия обтюратора

$$\alpha_o = \frac{n\nu_c \cdot 360}{\nu_л} \qquad (4.6)$$

мельканий яркости в киноизображении после его дискретизации не будет.

Из формулы (4.6) следует, что колебания яркости безинерционных ламп будут отфильтровываться киносъёмочным аппаратом при углах раскрытия обтюратора 86,4º; 172,8º; 259,2º и 345,6º. Основным является угол раскрытия обтюратора 172,8º. Это связано с тем, что в плёночных киноаппаратах углы раскрытия обтюратора, превышающие 180º, не могли применяться, поскольку при таких углах раскрытия обтюраторов существенно уменьшалось допустимое время перемещения киноплёнки на шаг кадра при смене кадров, а это, в свою очередь, приводило к увеличению силы воздействия зуба грейфера на межперфорационную перемычку киноплёнки при её перемещении и, соответственно, приводило к механическим повреждениям киноплёнки. Угол раскрытия обтюратора 86,4º не был оптимальным по экспонометрическим параметрам, поскольку в 2 раза уменьшал время экспонирования киноплёнки.

В североамериканских странах электрическая сеть переменного тока имеет частоту тока 60 Гц. Поэтому в США световой поток от безинерционных осветительных приборов, работающих от переменного тока с частотой 60 Гц, мерцает с частотой 120 Гц. Для подавления таких частот при киносъёмке, согласно формуле (4.6), необходимы углы раскрытия обтюратора 72º; 144º; 216º или 288º, из которых, по приведённым выше причинам, оптимальным является угол 144º.

2. Второй способ борьбы с миганием киноизображения при освещении объектов съёмки безинерционными лампами это увеличение частоты мигания ламп. Для этого питание ламп производится через специальные балласты — электрические приборы, повышающие частоту электрического тока до нескольких десятков тысяч Герц. Действительно, чем больше частота электрического тока, тем больше частота мигания безинерционного осветительного прибора, в два раза превышающая частоту электрического тока, тем существеннее уменьшается амплитуда колебаний сигнала киноизображения от кадра к кадру.

Например, если яркость осветительных приборов мерцает с частотой 30 кГц, то после киносъёмки объектов, освещаемых такими лампами, с частотой киносъёмки 24 кадр/с амплитуда колебаний яркости от кадра к кадру в киноизображении уменьшится, согласно формуле (4.4), почти в 10 000 раз относительно амплитуды колебаний яркости самих источников света. Однако если будет выполняться скоростная киносъёмка, например, с частотой 550 кадр/с, то амплитуда колебаний яркости от кадра к кадру в киноизображении уменьшится всего в 100 раз и будет заметна зрителю.

В цифровых киносъёмочных аппаратах часто обтюраторы не используются, а характеристика обтюрации электронного затвора имеет прямоугольную форму. В цифровых киноаппаратах, для устранения мигания записанного киноизображения необходимо устанавливать такое значение выдержки, при котором частота 100 Гц будет подавляться. Для этого опять приравняем $\nu_л = \nu_0$ и подставим $\nu_л$ в формулу (4.3), которую преобразуем к виду

$$t_{экс} = \frac{n}{\nu_л}. \qquad (4.7)$$

Формула (4.7) позволяет легко рассчитать значение выдержек, при которых в результате киносъёмки объектов, освещаемых безинерционными источниками света, мигания яркости в киноизображении не будет.

4.3. ОСВЕЩЕНИЕ ОБЪЕКТОВ КИНОСЪЁМКИ ИМПУЛЬСНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ СВЕТА

При освещении объектов съёмки импульсными источниками света могут возникать временны́е искажения киноизображения первого рода, аналогичные искажениям, возникающим при освещении объектов съёмки безинерционными световыми приборами. Методы борьбы с искажениями первого рода в этом случае аналогичны, приведённым в разделе 4.2.

ВЫВОДЫ

В результате дискретизации по времени сигналов киноизображения при киносъёмке возможно появление временны́х

искажений первого рода, проявляющихся при просмотре кинофильма зрителями как стробоскопический эффект. Для предотвращения появления таких искажений необходимо руководствоваться следующими правилами:

1. Идеальным вариантом будет, если выполняются требования теоремы Котельникова: временны́е частоты изменения яркости объектов съёмки не должны превышать половины частоты киносъёмки, а если временно́й сигнал содержит спектр временны́х частот, то максимальная временна́я частота из спектра временны́х частот не должна превышать половины частоты киносъёмки. Однако в реальной практике киносъёмки обеспечить выполнение этого условия часто не представляется возможным.

2. Если имеются основные временны́е частоты $\nu_{об}$ изменения яркости объектов съёмки, превышающие половину частоты киносъёмки, то необходимо по формуле:

$$\alpha_o = \frac{n\nu_c \cdot 360}{\nu_{об}} \qquad (4.8)$$

произвести подбор оптимальных допустимых углов раскрытия обтюратора, при которых искажения первого рода не возникают.

Если удобнее работать не с углами раскрытия обтюратора, а с величинами времени экспонирования, то вместо формулы (4.8) предлагается использовать очень простую формулу:

$$t_{экс} = \frac{n}{\nu_{об}}. \qquad (4.9)$$

5. ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ИСКАЖЕНИЯ ЦИФРОВЫХ КИНОИЗОБРАЖЕНИЙ

Под пространственными преобразованиями киноизображения понимаются преобразования вдоль двух пространственных координат в плоскости киноплёнки или матрицы.

В качестве примера рассмотрим периодическую пространственную структуру в объекте киносъёмки (рис. 5.1), представляющую собой чередующиеся тёмные и светлые полосы одинакового размера (например, полоски на платье героини). Киносъёмочный объектив строит изображение этого объекта съёмки в плоскости светочувствительного слоя с уменьшенным размером l', величину которого можно приблизительно рассчитать из формулы (2.6) или более точно — из формулы (2.7). Изображение на поверхности светочувствительного слоя настолько мало, что на 1 мм помещается, как правило, несколько периодов изменения освещённости (пар из двух полос: одной чёрной и одной белой) в изображении такого объекта съёмки.

Как показано в разделе 3.3, периодический сигнал можно представить в виде его спектра, т. е. набора гармоник с разными амплитудами и частотами, которые при их сложении составляют анализируемый сигнал, в рассматриваемом примере периодическую структуру чередующихся чёрных и белых полос. При этом, частота первой гармоники совпадает с частотой периодического сигнала, а частоты остальных гармоник кратны частоте периодического сигнала. Каждая из гармоник спектра пространственного сигнала и есть пространственная частота сигнала.

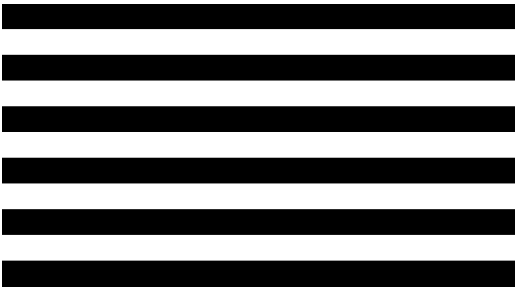


Рис. 5.1. Пример периодической пространственной структуры в объекте киносъёмки (например, полоски на платье героини или штриховая мира для контроля качества киноизображения)

Итак, пространственная частота это количество периодов гармонического распределения освещённости в киноизображении, приходящихся на длину в 1 мм по поверхности матрицы или киноплёнки. Измеряются пространственные частоты, в соответствии с их определением, в линиях на миллиметр (ещё раз подчеркнём, что под линией понимается пара из чёрной полосы и светлой полосы), а поскольку количество линий это безразмерная величина, то пространственные частоты измеряются в 1/мм или $мм^{-1}$.

В театральном кинематографе, основанном на плёночной технологии, при киносъёмке производится развёртка оптического изображения, сформированного киносъёмочным объективом, по поверхности светочувствительного слоя киноплёнки, т. е. совмещение оптического изображения со светочувствительным слоем киноплёнки в кадровом окне. В процессе киносъёмки происходит фильтрация и преобразования киноизображения по пространственным координатам, приводящие к снижению чёткости и резкости киноизображения.

Все происходящие при киносъёмке трансформации киноизображения, а также при преобразовании и воспроизведении киноизображения описываются функциями рассеяния точки каждого элемента кинематографического процесса. Целиком кинематографический процесс характеризуется итоговой функцией рассеяния точки, определяемой как свёртка функ-

ций рассеяния точки всех элементов кинематографического процесса.

Как и в случае временны́х сигналов, часто удобнее анализировать прохождение сигнала киноизображения в кинематографическом процессе в частотной области. Для этого, используя двумерное преобразование Фурье, переходят к частотным характеристикам входного и выходного сигналов киноизображения, а вместо функций рассеяния точки применяют пространственные частотные характеристики* элементов кинематографического процесса. На любом этапе анализа преобразований киноизображения всегда можно вернуться к сигналу киноизображения, с помощью обратного двумерного преобразования Фурье.

В плёночном киносъёмочном аппарате дискретизация киноизображения по пространственным координатам не производится. Поэтому и искажений, вызываемых дискретизацией по пространственным координатам, быть не может.

В цифровом киносъёмочном аппарате разбиение светочувствительного слоя на отдельные пиксели приводит к дискретизации киноизображения по пространственным координатам. Каждый пиксель в процессе поглощения им фотонов сигнала киноизображения усредняет освещённость в пределах площади пикселя на светочувствительном слое матрицы.

Изменения освещённости по пространственным координатам светочувствительного слоя для каждого элементарного участка кадра являются входным сигналом киноизображения для матрицы. Если форма поверхности пикселя прямоугольная, как показано на рис. 2.5, то пропускная характери-

---

* В литературе, особенно в оптической, наряду с термином «пространственная частотная характеристика» часто используются термины «оптическая передаточная функция», «частотно-контрастная характеристика», «контрастно-частотная характеристика», определяющие одно и то же понятие. В теории преобразований сигналов киноизображений правильнее применять термин «пространственная частотная характеристика» для разделения с частотными характеристиками преобразования сигналов киноизображения по другим координатам, например по времени.

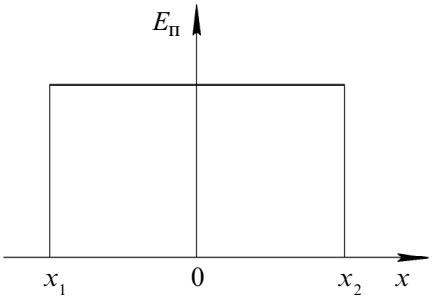


Рис. 5.2. Характеристика пропускания пикселя по пространственной координате x

стика пикселя по пространственной координате x будет иметь вид, показанный на рис. 5.2, где $l_п = x_2 - x_1$ — ширина светочувствительной области на поверхности пикселя. Применяя преобразование Фурье к прямоугольной характеристике пропускания пикселя по пространственной координате, получаем пространственную частотную характеристику пикселя (пример приведён на рис. 5.3), характеризующую зависимость коэффициента передачи контраста от пространственных частот.

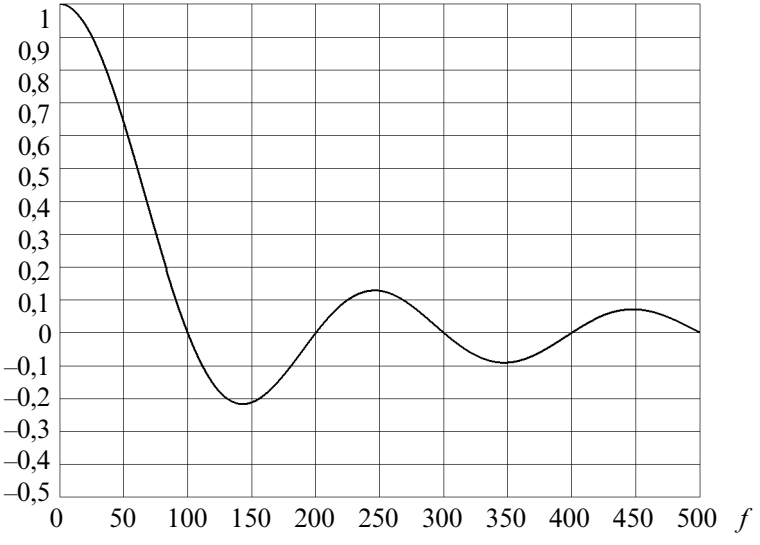


Рис. 5.3. Пространственная частотная характеристика пикселя с прямоугольной площадью и шириной пикселя 10 микрон

Пространственная частотная характеристика пикселя при прямоугольной характеристике пропускания равна нулю, когда частоты

$$f_0 = \frac{n}{l_{\text{п}}}. \tag{5.1}$$

Поскольку форма у рассматриваемого пикселя, чаще всего, квадратная, то пространственные частотные характеристики пикселя по двум ортогональным пространственным координатам будут одинаковыми.

Частота пространственной дискретизации $f_{\text{д}}$ сигнала киноизображения определяется расстоянием $l_{\text{цп}}$ между пикселями в матрице:

$$f_{\text{д}} = \frac{1}{2l_{\text{цп}}}. \tag{5.2}$$

Заметим, что расстояние $l_{\text{цп}}$ в матрицах больше ширины $l_{\text{п}}$ светочувствительной области пикселя (см. рис. 2.5). Размещение перед каждым пикселем собирающих линз несколько снижает разницу между $l_{\text{цп}}$ и $l_{\text{п}}$, тем самым снижая потери света и неизбежное при этом паразитное светорассеяние матрицей. В идеальном случае $l_{\text{цп}} = l_{\text{п}}$.

Рассмотрим конкретный пример. Пусть ширина светочувствительного слоя матрицы равна 30,7×15,8 мм при полном разрешении 6144×3160 пикселей (кинокамера RED Dragon), тогда частота пространственной дискретизации составит 100 мм$^{-1}$. Если же ширина светочувствительного слоя матрицы, например, равна 24 мм, а количество пикселей по горизонтали — 1920, то частота пространственной дискретизации составляет всего 40 мм$^{-1}$.

Как показано в разделе 3.5, искажения первого рода при пространственной дискретизации сигнала не возникнут, если частота пространственной дискретизации как минимум в два раза больше максимальной пространственной частоты в

спектре сигнала киноизображения. Таким образом, спектр пространственных частот сигнала киноизображения должен быть в первом примере ограничен пространственными частотами до 50 мм$^{-1}$, а во втором случае — до 20 мм$^{-1}$.

Большинство реальных объектов съёмки характеризуется чёткими границами, поэтому имеет спектры, в которых присутствует большое количество пространственных частот, возможно и бесконечное число частот в спектре. Например, объект съёмки, показанный на рис. 5.1, характеризуется бесконечным количеством гармоник в его пространственном спектре.

Высокие пространственные частоты входного сигнала киноизображения фильтруются киносъёмочным объективом, выполняющим не только функцию формирования оптического изображения, но и оптического фильтра из-за присутствующих у него оптических аберраций и из-за дифракции света на апертурной диафрагме. Однако в цифровой киносъёмочной аппаратуре фильтрующего действия объектива недостаточно для устранения возможности появления искажений первого рода. Поэтому в цифровых киносъёмочных аппаратах перед матрицей устанавливают дополнительный оптический фильтр, так называемый OLPF-фильтр, который не только выполняет пространственную фильтрацию сигнала киноизображения, но и корректирует сигнал киноизображения по спектру, в том числе отсекает инфракрасное излучение*, а также является защитным фильтром, предохраняющим светочувствительный слой матрицы от внешнего воздействия и пыли.

Возникающие искажения первого рода, порождённые пространственной дискретизацией сигналов киноизображения, проявляются в виде муара на периодических пространственных структурах.

Рассмотрим два конкретных примера.

Пусть при киносъёмке объекта, имеющего периодическую пространственную структуру (см. рис. 5.1), его изобра-

* Современные матрицы, применяемые в цифровой киносъёмочной аппаратуре, чувствительны к инфракрасному излучению.

жение таково, что ширина изображения одной полосы равна расстоянию между центрами пикселей по вертикали, а направление изображения полос параллельно направлению горизонтальных рядов пикселей матрицы. Тогда если каждая полоса располагается строго вдоль одного ряда горизонтальных пикселей, то изображение объекта съёмки запишется без искажений. Однако если изображение рассматриваемого объекта сместится в вертикальном направлении на половину расстояния между центрами соседних пикселей, то после дискретизации изображение такого объекта будет равномерным по яркости, т. е. информация о полосах в объекте съёмки исчезнет.

Допустим, что расстояние между центрами пикселей равно 10 микронам (100 пикселей на 1 мм), а ширина каждой полосы в изображении объекта — 12,5 микронам (80 полос на 1 мм). Следовательно, пространственная частота дискретизации составляет 50 мм$^{-1}$, а основная пространственная частота в сигнале киноизображения — 40 мм$^{-1}$. При таких исходных данных не выполняется теорема Котельникова, и в результате дискретизации появляются ложные пространственные частоты, минимальная из которых равна

$$|40-50|=10 \text{ мм}^{-1}.$$

Рис. 5.4. Увеличенное изображение объекта киносъёмки с периодической пространственной структурой из рис. 5.1 при пространственной частоте дискретизации 50 мм$^{-1}$ и основной пространственной частоте в сигнале киноизображения 40 мм$^{-1}$. Видна выраженная частота дискретизации (по общему количеству полос) и ложная низкочастотная пространственная частота 10 мм$^{-1}$ — (повторяющиеся блоки по пять полос)

Результат пространственной дискретизации при таких исходных данных киносъёмки показан на рис. 5.4, на котором ярко выражена частота дискретизации 50 мм$^{-1}$ (именно такое количество полос помещается на 1 мм в киноизображении в плоскости матрицы) и ложная низкочастотная пространственная частота 10 мм$^{-1}$ — повторяющиеся в киноизображении группы по пять полос.

Теперь рассмотрим вариант, при котором изображения полос наклонены относительно горизонтальных рядов пикселей. В этом случае искажения в виде муара появятся даже тогда, когда частота пространственной дискретизации совпадает с основной частотой изображения периодического объекта.

В качестве примера на рис. 5.5 показано киноизображение, образующееся при цифровой киносъёмке при частоте пространственной дискретизации 50 мм$^{-1}$, основной пространственной частоте в сигнале киноизображения 40 мм$^{-1}$ и наклоне изображения полос относительно горизонтальных рядов пикселей в 5,7°. На рис. 5.5 чётко видны вертикальные полосы муара, расстояние между которыми определяется углом наклона полос относительно горизонтального ряда пикселей: чем меньше угол наклона, тем больше расстояние между вертикальными полосами муара.

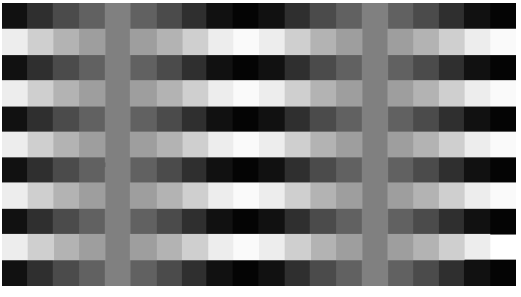
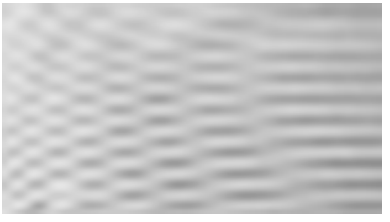


Рис. 5.5. Увеличенное изображение объекта киносъёмки с периодической пространственной структурой из рис. 5.1 при пространственной частоте дискретизации 50 мм$^{-1}$, основной пространственной частоте в сигнале киноизображения 40 мм$^{-1}$ и наклоне изображения полос относительно горизонтальных рядов пикселей в 5,7°. Видны выраженные вертикальные полосы муара

а)



б)

Рис. 5.6. Пример вариантов муара, вызванного пространственной дискретизацией сигнала киноизображения при реальной киносъёмке [24]:
а — платье целиком,
б — увеличенный фрагмент левого платья

В реальной киносъёмке объекты, имеющие периодическую структуру, почти всегда смещены и наклонены относительно горизонтальных или вертикальных (когда полосы в объекте съёмки вертикальны) рядов пикселей, да ещё и изменяют своё пространственное положение во время киносъёмки (объекты съёмки могут перемещаться относительно киносъёмочного аппарата). Поэтому появляются причудливые картины муарового узора, сочетающие появление ложных пространственных частот с ортогональными ложными полосами муара, изменяющимися в течение времени демонстрации сцены при кинопоказе.

На рис. 5.6 показан реальный пример муара, вызванного пространственной дискретизацией сигнала киноизображения, на котором можно различить оба типа пространственных искажений, рассмотренных выше.

5.1. РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ПРИ ЦИФРОВОЙ КИНОСЪЁМКЕ

Разрешающая способность это максимальная пространственная частота, при которой светлые и тёмные полосы в изображении миры* ещё не сливаются (видны раздельно).

Разрешающая способность киносъёмочного объектива зависит от аберраций объектива, а при их малой величине — от дифракции света на краях апертурной диафрагмы и оправах линз.

Анализ графика пространственной частотной характеристики объектива показывает, что он непрерывно снижается с единичного значения коэффициента передачи контраста при пространственной частоте, равной 1 (что означает однородное по яркости или освещённости киноизображение в пределах некоторого участка кадра), до такого значения коэффициента передачи контраста, при котором достигается граница между ещё различимыми и уже не различимыми тёмными и светлыми полосами в изображении миры. Сответствующая этой границе пространственная частота и является разрешающей способностью объектива.

Аналогичный вид (но меньший диапазон пространственных частот) имеет график пространственной частотной характеристики фотографического изображения (пример приведён на рис. 5.7), которое также является аналоговым изображением, по причине чего график пространственной частотной характеристики ограничен некоторой максимальной пространственной частотой — фотографической разрешающей способностью.

При цифровой киносъёмке, в отличие от аналоговой — плёночной технологии киносъёмки, выполняется простран-

---

* Мира — тест-объект, предназначенный для определения разрешающей системы оптических, фотографических и кинематографических систем. Мира предсталяет собой плоский тест-объект из прозрачного или непрозрачного материала, на который нанесён стандартный рисунок из чередующихся тёмных прямоугольных штрихов на светлом фоне с закономерно изменяющейся частотой (штриховые миры) или чередующихся тёмных и светлых секторов (радиальная мира) [49].

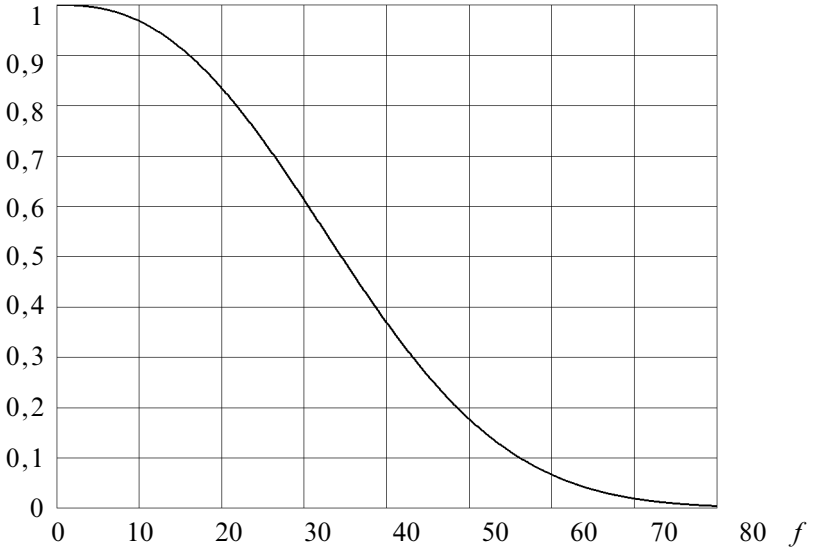


Рис. 5.7. Пример пространственной частотной характеристики плёночного киносъёмочного аппарата

ственная дискретизация сигнала киноизображения. В результате пространственной дискретизации сигнала киноизображения график пространственной частотной характеристики цифрового киносъёмочного аппарата многократно пересекает ось пространственных частот (см. рис. 5.3). Это означает, что при увеличении пространственной частоты коэффициент передачи контраста убывает от 1 до 0. Когда коэффициент передачи контраста уменьшается до значения, близкого к нулю, когда различие между тёмными и светлыми полосами миры в изображении уже не видно, соответствующая этому значению коэффициента передачи контраста пространственная частота является разрешающей способностью цифрового киносъёмочного аппарата.

Однако при дальнейшем увеличении пространственной частоты коэффициент передачи контраста становится отрицательным, а коэффициент передачи контраста по абсолютной величине сначала начинает возрастать (тёмные и светлые полосы вновь становятся различимыми), а затем снова убывать до 0. Получается, что имеется вторая простран-

ственная частота, которую тоже можно назвать разрешающей способностью.

Отрицательное значение коэффициента передачи контраста означают, что в киноизображении светлые и тёмные полосы сдвигаются по фазе на 180º. Зритель будет воспринимать сдвиг полос по фазе на 180º как замещение одних полос другими: на месте светлых полос окажутся тёмные и, наоборот, на месте тёмных полос — светлые. Это хорошо видно на рис. 5.6, *б*, если перемещать взор горизонтально вдоль любой полосы.

Затем находится третья пространственная частота, соответствующая определению разрешающей способности, и т. д. Иными словами, все пространственные частоты, определяемые из уравнения (5.1), которые не будут отфильтрованы до процесса пространственной дискретизации сигнала киноизображения, могут считаться разрешающими способностями разного порядка.

Ещё раз повторим, что для выполнения требований теоремы Котельникова все пространственные частоты, превышающие половину частоты пространственной дискретизации, должны быть отфильтрованы до процесса пространственной дискретизации. Только в этом случае в киноизображении будет одно значение разрешающей способности — минимальное значение, рассчитанное по формуле (5.1) при $n = 1$. Остальные потенциальные значения разрешающей способности, соответствующие n>1, проявляемые как пространственные искажения первого рода, в киноизображении будут отсутствовать.

ВЫВОДЫ

В результате пространственной дискретизации сигналов киноизображения при киносъёмке возможно появление пространственных искажений первого рода, проявляющихся при просмотре кинофильма зрителями как муар на периодических пространственных структурах. Для предотвращения вероятности появления этих искажений необходимо руководствоваться следующими правилами.

1. Необходимо строгое выполнение требования теоремы Котельникова: пространственные частоты изменения яркости

объектов съёмки, приведённые к плоскости светочувствительного слоя матрицы, не должны превышать половины частоты пространственной дискретизации сигнала киноизображения, рассчитываемой по формуле (5.2).

2. Поскольку в реальной практике первое правило не всегда выполнимо, то необходимо до пространственной дискретизации киноизображения осуществлять пространственную фильтрацию киноизображения. По этой причине киносъёмочные объективы, применяемые в цифровой киносъёмочной аппаратуре, должны быть согласованы с размерами и количеством пикселей в матрице. Если у объектива разрешающая способность больше, то это не означает, что он качественнее. Оптическое изображение у такого объектива будет качественнее, но как оптический фильтр такой объектив будет работать хуже, и следовательно, в киноизображении могут в результате появляться пространственные искажения первого рода.

3. Для осуществления дополнительной фильтрации пространственных частот в цифровых киносъёмочных аппаратах перед матрицей размещают дополнительный оптический фильтр, так называемый OLPF-фильтр.

6. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫ́Е ИСКАЖЕНИЯ КИНОИЗОБРАЖЕНИЙ

Ранее были рассмотрены искажения, возникающие в результате временно́й и пространственной дискретизации сигналов киноизображения, когда объекты киносъёмки и киносъёмочная камера неподвижны во время киносъёмки, т. е. когда изображения объектов съёмки, формируемые киносъёмочным объективом, неподвижны относительно светочувствительного слоя в течение времени киносъёмки.

Однако киноизображение это не статичная фотография, кинофильм это средство воспроизведения движущихся изображений объектов. Во время киносъёмки оптические изображения объектов съёмки перемещаются относительно светочувствительного слоя, при этом в результате дискретизации по времени изображения движущихся объектов в каждом кадре записываются смазанными и скачкообразно меняющими своё положение от кадра к кадру.

При воспроизведении такого изображения на киноэкране или на экране телевизора смазанное изображение будет перемещаться скачками в направлении движения изображения объекта. Поэтому изначально условия киносъёмки должны быть рассчитаны таким образом, чтобы при кинопоказе смаз изображения движущегося объекта не мешал зрителю воспринимать этот объект, а скорость перемещения изображения объекта не приводила бы к восприятию этого движения как прерывистого, скачкообразного.

Именно из этих требований рассчитывают, например, допустимую скорость поворота киносъёмочной камеры при па-

норамировании и требования к средствам стабилизации кинокамеры при киносъёмке в движении.

Кроме перечисленных искажений, возможно появление специфичных искажений первого рода в киноизображении движущихся объектов, наиболее часто встречающиеся из которых рассмотрены в данной главе.

6.1. КИНОСЪЁМКА ОБЪЕКТОВ, СОВЕРШАЮЩИХ ПЕРИОДИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ

Анализ киносъёмки объектов, совершающих периодическое движение, выполним на примере простого вида движения.

Пусть объектом киносъёмки является маятник, совершающий колебания с частотой $\nu_м$, а киносъёмка маятника или интерьера, в котором находится колеблющийся маятник, выполняется с частотой киносъёмки $\nu_с$. Тогда время экспонирования одного кадра $t_{экс}$ будет определять размер дуги траектории груза маятника, в пределах которой запишется размытое изображение груза маятника, а период смены кадров $T_с = \frac{1}{\nu_с}$ — сдвиг записанной дуги в траектории движения груза маятника в двух соседних кадрах. Конечно же, при расчётах размытия и сдвига изображения груза маятника в кадрах кроме перечисленных выше параметров будут задействованы также скорость движения груза маятника, расстояние киносъёмки и фокусное расстояние объектива.

Анализируя процесс дискретизации и учитывая теорему Котельникова, можно оценить, как будет зритель воспринимать киноизображение маятника при просмотре кинофильма.

Если $\nu_м < \frac{\nu_с}{2}$, то выполняется теорема Котельникова. В каждом кадре запишется часть дуги траектории движения груза маятника, размер дуги в киноизображении определяется временем экспонирования $t_{экс}$. При просмотре такого киноизображения зритель увидит изображение колеблющегося маятника так, как во время киносъёмки колебался реальный маятник, но более размыто, чем в реальной жизни.

Если $\nu_м = \frac{\nu_с}{2}$, то изображение дуги траектории груза маятника во всех нечётных кадрах будет занимать одно пространственное положение, а во всех чётных кадрах — другое. Например, если время экспонирования равно $t_{экс} = \frac{T_с}{2}$, т. е. угол раскрытия обтюратора $\alpha_о = 180°$, и время начала экспонирования первого кадра совпадает с моментом движения груза маятника от крайней левой точки траектории в сторону вертикального положения, то во всех нечётных кадрах запишется левая дуга траектории движения груза маятника, а во всех чётных кадрах — правая дуга траектории движения груза маятника. При просмотре кинофильма зритель, возможно, отметит, что он видит быстро сменяющиеся два положения изображения размытого вполовину траектории груза маятника. Возможно, зритель скажет, что изображение маятника быстро, но заметно для глаз мелькает.

Однако если синхронизация начала экспонирования первого кадра будет по точке, соответствующей четверти траектории, а направление движения груза маятника — в сторону вертикали, то зритель увидит неподвижную размытую дугу в пределах центральной половины траектории движения груза маятника, т. е. амплитуда колебаний маятника в киноизображении уменьшится в 2 раза.

Если $\nu_с > \nu_м > \frac{\nu_с}{2}$, то в результате временно́й дискретизации сигнала киноизображения во временно́м спектре появятся ложные низкие частоты $\nu_л = \nu_м - \nu_с$. Поэтому маятник в киноизображении будет колебаться медленнее и с другой фазой. Но зритель на это не обратит внимания, поскольку у него нет возможности сопоставить в киноизображении частоту и фазу колебаний маятника с частотой и фазой колебаний реального маятника при киносъёмке.

При $\nu_м > \nu_с$ во всех кадрах запишется неподвижная дуга траектории груза маятника. Зритель никаких колебаний маятника воспринимать не будет, при этом длина дуги траек-

тории, которую будет видеть зритель, определится значением времени $t_{экс}$.

Дальнейшее увеличение частоты $\nu_м$ повторит изменение частоты колебаний маятника в киноизображении в рассмотренном выше порядке.

Точно таким же образом будут возникать искажения первого рода в киноизображении любых объектов съёмки, совершающих периодические движения с частотами, превышающими половину частоты киносъёмки.

6.2. КИНОСЪЁМКА ОБЪЕКТОВ С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРОЙ, ПРИ ИХ ДВИЖЕНИИ ОТНОСИТЕЛЬНО КИНОКАМЕРЫ

Объекты киносъёмки, характеризуемые периодической структурой, попадают в снимаемую сцену часто. К таким объектам относятся, например, параллельные полосы на ткани, ламели в жалюзи, прутья забора, кирпичная кладка и т. д.

При киносъёмке цифровой камерой таких объектов, в случае, когда киносъёмочная камера и объекты съёмки неподвижны и если их пространственные частоты в киноизображении будут превышать половину частоты пространственной дискретизации матрицы, то возникнут, как показано в главе 5, пространственные искажения первого рода, проявляющиеся в появлении муара.

В данном разделе рассмотрим искажения объектов с периодической пространственной структурой в киноизображении, возникающие при взаимном перемещении объектов съёмки и кинокамеры в процессе киносъёмки.

Пусть объект съёмки характеризуется следующими параметрами:

— имеет некую периодическую структуру с пространственным шагом $l_{п\,об}$;

— удалён от киносъёмочного аппарата на расстояние a;

— развёрнут в пространстве таким образом, что его периодическая структура перпендикулярна оптической оси объектива;

— равномерно перемещается в направлении, перпендикулярном оптической оси объектива с постоянной скоростью $V_{об}$.

Последнее условие упрощает математические рассуждения, не сужая общности анализа.

Пусть киносъёмочный аппарат производит киносъёмку с частотой $\nu_с$.

Оптическая ось объектива киносъёмочного аппарата переходит от одного элемента периодической структуры к соседнему элементу за время

$$T_{об} = \frac{l_{п\,об}}{V_{об}}, \tag{6.1}$$

а временна́я частота смены элементов периодической структуры относительно оптической оси объектива составит

$$\nu_{об} = \frac{1}{T_{об}} = \frac{V_{об}}{l_{п\,об}}. \tag{6.2}$$

Очевидно, что временна́я частота смены изображений элементов объекта в любой фиксированной точке пространства изображений будет точно такая же. При этом, если частота $\nu_{об} < \frac{\nu_с}{2}$, то искажения первого рода возникать не будут. Но если частота $\nu_{об}$ превысит $\frac{\nu_с}{2}$, то появится ложная низкая частота, как проявление временны́х искажений первого рода.

Для определения максимально допустимой скорости движения киносъёмочного аппарата относительно объекта съёмки с периодической структурой подставим $\nu_{об} = \frac{\nu_с}{2}$ в формулу (6.2) и преобразуем формулу к виду

$$V_{доп\,об} = \frac{\nu_с \cdot l_{п\,об}}{2}. \tag{6.3}$$

Например, если с частотой 24 кадр/с производится киносъёмка сопровождения движущегося с постоянной скоростью актёра на фоне кирпичной стены (длина кирпича 25 см согласно ГОСТ 530-2007), то максимально допустимая скорость движения актёра и, соответственно, киносъёмочного аппарата вдоль кирпичной стены согласно формуле (6.3) равна $\frac{24 \cdot 0{,}25}{2} = 3 \frac{\text{м}}{\text{с}} \left(10{,}8 \frac{\text{км}}{\text{час}}\right)$. Если скорость движения киносъёмочного аппарата превысит допустимую и будет в пределах $3 - 6 \frac{\text{м}}{\text{с}} \left(10{,}8 - 21{,}6 \frac{\text{км}}{\text{час}}\right)$, то в киноизображении (при условии, что в кадре только стена и двигающийся вдоль стены актёр) зритель увидит, что актёр стал двигаться замедленно и задом наперёд, а при скорости $6 \frac{\text{м}}{\text{с}} \left(21{,}6 \frac{\text{км}}{\text{час}}\right)$ в киноизображении стена будет неподвижна, а актёр — двигаться!

Используя приведённый алгоритм, можно анализировать условия обеспечения бездефектной киносъёмки любых объектов, имеющих периодическую пространственную структуру, при их линейном или круговом движении относительно кинокамеры.

6.3. КИНОСЪЁМКА ДВИЖУЩЕГОСЯ АВТОМОБИЛЯ

При киносъёмке почти всех современных кинофильмов в кадре часто находятся движущиеся автомобили. При просмотре такого кинофильма в кинотеатре или по телевизору зритель иногда замечает, что колеса движущегося автомобиля неожиданно начинают вращаться медленнее, чем должно быть на самом деле, останавливаются или даже вращаются в противоположном направлении. Рассмотрим, почему это происходит.

Колесо автомобиля содержит ряд симметрично расположенных одинаковых элементов: лучи и отверстия диска, болты, рисунок протектора шины и т. д. (рис. 6.1). Поскольку мелкие элементы либо не различимы глазом при просмотре кинофильма, либо теряются в результате смаза изображения

Рис. 6.1. Колесо легкового автомобиля с пятью лучами диска

вращающегося колеса, то зритель воспринимает вращение колеса прежде всего через круговое движение лучей или крупных отверстий диска колеса. Обычно их количество на колесе от 3 до 18. Для грузовых автомобилей основным элементом, характеризующим вращение колеса, чаще всего является круговое движение контрастного рисунка протектора шины. Элементы дорожного рисунка протектора образуют продольные и поперечные рёбра и канавки. Нас интересует в первую очередь рисунок протектора на боковой стороне шины, поскольку он чётко виден и гораздо крупнее, чем на колёсах легковых автомобилей. На фотографии, приведённой на рис. 6.2, боковой рисунок протектора состоит из 24 элементов.

Предположим, что колесо автомобиля содержит k наиболее крупных повторяющихся структур, например лучей диска, а скорость вращения колеса составляет $n_к$ оборотов в секунду. Тогда в киносъёмочном аппарате освещённость участка светочувствительной матрицы или участка кино-

Рис. 6.2. Колесо грузового автомобиля с 24 повторяющимися элементами в рисунке протектора шины

плёнки, через который проходит изображение лучей диска колеса, будет изменяться с частотой

$$\nu_{эл} = kn_к. \qquad (6.4)$$

В результате дискретизации киноизображения по времени при киносъёмке регистрируется последовательность кадров, смещённых во времени друг относительно друга на период смены кадров $T_c = \frac{1}{\nu_c}$, где ν_c — частота киносъёмки.

Согласно теореме Котельникова, без искажений передаются только частоты $\nu_{эл} < \frac{\nu_c}{2}$. При этом ограничении ложные спектры, возникающие в результате дискретизации сигнала киноизображения, не будут накладываться друг на друга и на основной спектр. Поэтому минимальной частотой $\nu^*_{эл\,min}$ в дискретном сигнале будет частота $\nu_{эл}$, т. е. $\nu^*_{эл\,min} = \nu_{эл}$ и искажений первого рода не будет.

Если же частота $\nu_{эл}$ будет больше $\frac{\nu_c}{2}$, то даже при применении идеального частотного фильтра до или во время демонстрации кинофильма, в киноизображении будут присутствовать искажения первого рода, поскольку ложные временны́е спектры, возникшие в результате дискретизации, наложатся на основной спектр киноизображения.

Величину минимальной ложной частоты $\nu^*_{эл\,min}$ можно определить следующим образом: надо последовательно отнимать от частоты $\nu_{эл}$ частоту киносъёмки ν_c до тех пор, пока не будет получено минимальное по абсолютной величине значение ложной частоты.

Рассмотрим неподвижный автомобиль, постепенно начинающий набирать скорость. При временны́х частотах $\nu_{эл}<\frac{\nu_c}{2}$ лучи диска колеса в киноизображении увеличивают скорость поворота и движутся в направлении, соответствующем направлению вращения колеса автомобиля (частота $\nu_{эл}$ положительная).

Когда $\nu_{эл}$ станет равной $\frac{\nu_c}{2}$, лучи диска в киноизображении колеса как бы одновременно вращаются с двумя частотами $\frac{\nu_c}{2}$ и $-\frac{\nu_c}{2}$. Зритель воспринимает такое киноизображение как неподвижное или чаще как неустойчивое (изображение колеса вращается то в одну, то в другую сторону в результате разницы в размерах лучей и различий их расположений друг относительно друга, а также в результате малейших изменений скорости движения автомобиля). Число лучей диска у колеса зритель видит удвоенным.

При увеличении скорости движения автомобиля в диапазоне частот $\frac{\nu_c}{2}<\nu_{эл}<\nu_c$ минимальная по абсолютной величине ложная частота равна $\nu^*_{эл\,min}=\nu_{эл}-\nu_c$. Её значение будет

в пределах $-\frac{\nu_c}{2}<\nu^*_{эл\,min}<0$. Зритель увидит в кинофильме, что колесо вращается замедленно, так как лучи диска сменяются не с частотой $\nu_{эл}$, а с меньшей частотой $\nu^*_{эл\,min}$. Если бы при этом в кадре было бы одно только колесо, то зритель не узнал бы, что колесо в киноизображении вращается медленнее, чем оно вращалось при киносъёмке. Но зритель видит не только колесо, но и автомобиль (или его часть), проезжающий относительно других объектов съёмки, в том числе неподвижных. Поэтому зритель оценивает скорость движения автомобиля в кинофильме и невольно сопоставляет её с видимой скоростью вращения колеса и в результате замечает, что воспринимаемые им скорости автомобиля и колеса не согласуются между собой, сочетаются не так, как зритель видит в реальной жизни. Но это может быть не очень существенным в оценке зрителя по сравнению с проявлением сущности знака «–» в значении частоты $\nu^*_{эл\,min}$. Знак «–» означает, что в киноизображении колесо вращается в противоположном направлении! Именно это искажение — вращение колеса в киноизображении не в ту сторону, как оно должно вращаться, как оно вращалось в реальности, в соответствии с направлением движения автомобиля, зритель, конечно же, увидит, и этот дефект киноизображения будет его раздражать.

При частоте $\nu_{эл}=\nu_c$ минимальная ложная частота равна нулю: $\nu^*_{эл\,min}=\nu_{эл}-\nu_c=0$. Такое значение частоты означает, что в киноизображении положение каждого луча диска колеса от кадра к кадру меняться не будет. Но такое колесо зритель видит неподвижным, и никак иначе, несмотря на видимое движение автомобиля в киноизображении.

Дальнейшее увеличение скорости движения автомобиля приведёт к повторениям рассмотренного цикла изменения частот движения лучей диска колеса, которые в киноизображении никогда не будут превышать половины частоты ки-

носъёмки: минимальная ложная частота по абсолютной величине всегда меньше половины частоты киносъёмки. При этом лучи диска в изображении колеса будут всё больше и больше смазанными.

Определим, при каких скоростях движения автомобиля возникают рассматриваемые искажения, называемые искажениями первого рода. Для этого рассмотрим 25 наиболее продаваемых автомобилей на российском рынке в 2016 году (таблица 6.1), список которых взят с сайта https://motor.ru [48], а сведения о заводской комплектации автомобилей с сайта http://www.shinservice.ru [44]. Приведённые в таблице 6.1 параметры шин показывают, что их размеры существенно различаются.

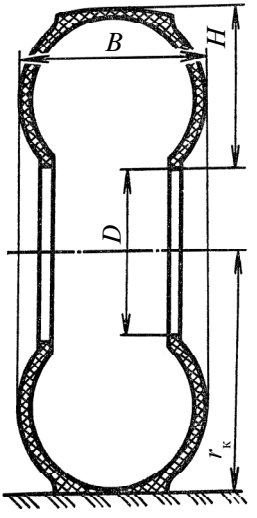


Рис. 6.3. Основные геометрические размеры шины колеса автомобиля: D — посадочный диаметр, B — ширина профиля, H — высота профиля, $r_к$ — радиус качения

Свяжем скорость движения автомобиля со скоростью вращения колеса.

Шины колеса характеризуются (рис. 6.3) посадочным диаметром D, шириной профиля B и высотой профиля H. Характеристики шины наносятся на её боковую поверхность: сначала приводится ширина профиля B в миллиметрах; затем после косой черты значение H/B, умноженное на 100; буква R, указывающая на радиальную конструкцию каркаса; и в конце — посадочный диаметр в дюймах. Например, шина самого продаваемого автомобиля в России в 2016 году Hyundai Solaris маркирована — 185/65R15.

Тогда радиус качения колеса (в миллиметрах) может быть рассчитан следующим образом:

$$r_к = \left(\frac{H}{B}\cdot\frac{1}{100}\right)B + 12{,}7D. \qquad (6.5)$$

Таблица 6.1

Самые продаваемые автомобили на российском рынке в 2016 году

Место	Модель	Количество проданных автомобилей в России в 2016 году	Серия шин
1	Hyundai Solaris	90380	185/65 R15 195/55 R16
2	Lada Granta	87726	175/70 R13 185/60 R14
3	Kia Rio	87662	185/65 R15 195/55 R16
4	Lada Vesta	55174	185/65 R15 195/55 R16
5	Volkswagen Polo	47702	175/70R14 185/60 R15
6	Renault Duster	44001	215/65 R16
7	Toyota RAV4	30603	225/65 R17 235/55 R18
8	Chevrolet Niva	29844	205/75 R15 215/65 R16
9	Renault Logan	29565	185/65 R15
10	Lada Largus	29341	185/65 R15
11	Renault Sandero	28557	185/65 R15
12	Toyota Camry	28063	215/60 R16 215/55 R17
13	Lada 4x4	27274	175/80 R16
14	Skoda Rapid	25931	185/60 R15 215/45 R16
15	Hyundai Creta 2WD	21929	205/65 R16 205/60 R17
16	Skoda Octavia	21759	195/65 R15 205/55 R16
17	Lada Kalina	20982	175/70 R13 175/65 R14

Окончание таблицы 6.1

Самые продаваемые автомобили на российском рынке в 2016 году

Место	Модель	Количество проданных автомобилей в России в 2016 году	Серия шин
18	Lada Xray	19943	195/65 R15 205/55 R16
19	UAZ Patriot	19381	245/70 R16
20	Kia Sportage	19003	215/70 R16 225/60 R17 245/45 R19
21	Nissan Qashqai	18723	215/65 R16 215/60 R17 215/55 R18 225/45 R19
22	Nissan X-Trail	17886	225/65 R17 225/60 R18
23	Lada Priora	17553	185/65 R14
24	Mazda CX-5	15790	225/65 R17 225/60 R18 225/55 R19
25	Kia cee'd	15081	195/65 R15 205/55 R16 225/45 R 17

Для рассматриваемого в качестве примера автомобиля Hyundai Solaris радиус качения колеса составляет $r_к = 0{,}65 \cdot 185 + 12{,}7 \cdot 15 = 311$ мм.

Рассчитанные по формуле (6.5) радиусы качения колёс приведены в таблице 6.2.

Скорость движения $V_а$ автомобиля связана с частотой $\nu_{эл}$ следующей зависимостью:

$$V_а = 2\pi r_к n_к = \frac{2\pi r_к \nu_{эл}}{k}. \qquad (6.6)$$

Таблица 6.2

Соответствие размеров радиальных шин серии 80, 70, 65, 60

№	Серия 80	Серия 70	Серия 65	Серия 60	Радиус качения $r_к$, мм
1		145/70R12			254
2		155/70R12		165/60R13	261–264
3		145/70R13	155/65R13 165/65R13	175/60R13	266–272
4		155/70R13	165/65R13 175/65R13 155/65R14	185/60R13 165/60R14	272–279
5	135/80R13	155/70R13	165/65R13	175/60R13 185/60R13 165/60R14	270–280
6	145/80R13	165/70R13	175/65R13 165/65R14	185/60R13 175/60R14	278–288
7	155/80R13	175/70R13	175/65R14	205/60R13 185/60R14	287–292
8	165/80R13	185/70R13	185/65R14	195/60R14 205/60R14	293–304
9		195/70R13	195/65R14	205/60R14 195/60R15	301–307
10		205/70R13	185/65R15 195/65R15	205/60R15	309–318
11		165/70R14	175/65R14 185/65R14	185/60R14 195/60R14	291–298
12		175/70R14	185/65R14 195/65R14	205/60R14	298–306
13	165/80R14	185/70R14	195/65R14 185/65R15	195/60R15 205/60R15	305–317
14	175/80R14	195/70R14	195/65R15	205/60R15 215/60R15	313–322
15	185/80R14	205/70R14	205/65R15 215/65R15	215/60R15 225/60R15	320–331
16		195/70R14 175/70R15	185/65R15 195/65R15	205/60R15 215/60R15	311–320

Окончание таблицы 6.2

Соответствие размеров радиальных шин серии 80, 70, 65, 60

№	Серия 80	Серия 70	Серия 65	Серия 60	Радиус качения $r_к$, мм
17	165/80R15	205/70R14 185/70R15	195/65R15 205/65R15	215/60R15 225/60R15	317–327
18		195/70R15 205/70R15	205/65R15 215/65R15	215/60R16	326–332
19		205/70R15	225/65R15	215/60R16 225/60R16	334–343
20		215/70R15 225/70R15	215/65R16	235/60R16	340–348

Таким образом, скорость движения автомобиля, при которой начинаются искажения воспроизведения частоты вращения колеса, линейно зависит от частоты киносъёмки $\nu_с$, количества лучей диска или отверстий в колесе k и радиуса качения колеса $r_к$.

Для определения максимально допустимой скорости движения автомобиля $V_{a\,max}$ приравняем частоту $\nu_{эл}$ половине частоты киносъёмки $\nu_{эл} = \frac{\nu_с}{2}$ и подставим в формулу (6.6):

$$V_{a\,max} = \frac{\pi r_к \nu_с}{k}. \qquad (6.7)$$

Очевидно, что чем больше $r_к$ и $\nu_с$ и чем меньше k, тем при большей скорости автомобиля его киноизображение будет записано без искажений. Например, если на колесо автомобиля установлена шина 225/70R15, а количество лучей диска колеса равно 3, то при телевизионной съёмке с частотой 25 кадр/с движение автомобиля будет записано без искажений в диапазоне скоростей от 0 до 32,8 км/час. А для шины 145/70R12 и 18 лучей диска колеса — от 0 до 4 км/час.

Таблица 6.3

Качество записи киноизображения движущегося автомобиля Hyundai Solaris при частоте киносъёмки 24 кадр/с

Количество лучей диска колеса	Скорость движения автомобиля		Характеристика качества записи киноизображения
	м/с	км/час	
3	$V_a < 7{,}79$	$V_a < 28{,}0$	Без искажений
5	$V_a < 4{,}68$	$V_a < 16{,}8$	
8	$V_a < 2{,}92$	$V_a < 10{,}5$	
12	$V_a < 1{,}95$	$V_a < 7{,}0$	
18	$V_a < 1{,}30$	$V_a < 4{,}7$	
3	$V_a = 7{,}79$	$V_a = 28{,}0$	Колесо неустойчиво неподвижно с удвоенным количеством лучей диска
5	$V_a = 4{,}68$	$V_a = 16{,}8$	
8	$V_a = 2{,}92$	$V_a = 10{,}5$	
12	$V_a = 1{,}95$	$V_a = 7{,}0$	
18	$V_a = 1{,}30$	$V_a = 4{,}7$	
3	$7{,}79 < V_a < 15{,}58$	$28{,}0 < V_a < 56{,}1$	Колесо вращается с меньшей скоростью и в противоположном направлении относительно реального колеса
5	$4{,}68 < V_a < 9{,}35$	$16{,}8 < V_a < 33{,}7$	
8	$2{,}92 < V_a < 5{,}84$	$10{,}5 < V_a < 21{,}0$	
12	$1{,}95 < V_a < 3{,}90$	$7{,}0 < V_a < 14{,}0$	
18	$1{,}30 < V_a < 2{,}60$	$4{,}7 < V_a < 9{,}3$	
3	$V_a = 15{,}58$	$V_a = 56{,}1$	Колесо неподвижно
5	$V_a = 9{,}35$	$V_a = 33{,}7$	
8	$V_a = 5{,}80$	$V_a = 21{,}0$	
12	$V_a = 3{,}90$	$V_a = 14{,}0$	
18	$V_a = 2{,}60$	$V_a = 9{,}3$	
3	$15{,}58 < V_a < 23{,}37$	$56{,}1 < V_a < 84{,}1$	Колесо вращается в правильном направлении, но с медленной скоростью
5	$9{,}35 < V_a < 14{,}0$	$33{,}7 < V_a < 50{,}5$	
8	$5{,}80 < V_a < 8{,}80$	$21{,}0 < V_a < 31{,}6$	
12	$3{,}90 < V_a < 5{,}84$	$14{,}0 < V_a < 21{,}0$	
18	$2{,}60 < V_a < 3{,}90$	$9{,}3 < V_a < 14{,}0$	

Таблица 6.4

Максимальная скорость движения в потоке рассмотренных 25 автомобилей, при которой в киноизображении не возникают искажения первого рода при условии, что на всех автомобилях количество лучей на всех дисках колёс ограничено по количеству лучей

Максимальное количество лучей на каждом диске колёс автомобилей	Максимально допустимая скорость автомобилей, движущихся в потоке	
	м/с	км/час
3	7,2	26,0
5	4,3	16,0
8	2,7	9,8
12	1,8	6,5
18	1,6	4,3

В таблице 6.3 приведены скорости движения автомобиля Hyundai Solaris, при которых в киноизображении видны искажения скорости вращения колёс, а в таблице 6.4 представлены максимально допустимые скорости потока автомобилей (при киносъёмке без искажений первого рода) при ограничении количества лучей на дисках всех колёс всех автомобилей.

Повторим, что появление искажений первого рода зависит от частоты киносъёмки, а не от времени экспонирования. От времени экспонирования зависит только величина смаза движущегося изображения (в нашем примере колеса автомобиля).

Выводы

1. Современные средства киносъёмочной техники не обеспечивают исключения появления искажений киноизображения первого рода при киносъёмке движущегося автомобиля.

2. Бездефектная киносъёмка возможна только при низких скоростях движения автомобиля, не превышающих значения

$V_{a\,max}$, получаемого из формулы (6.7) при $\nu_э$, равном половине частоты киносъёмки ν_c.

3. При киносъёмке движущихся автомобилей операторам рекомендуется использовать колеса с минимальным количеством симметрично расположенных одинаковых элементов (лучи, отверстия диска) или закрывать колеса декоративными сплошными дисками. Рекомендуется также проводить киносъёмку при скоростях движения автомобиля, не превышающих предварительно рассчитанной максимально возможной скорости $V_{a\,max}$. Если это невозможно, то проводить киносъёмку рекомендуется таким образом, чтобы боковая сторона колёс не попадала в кадр. Можно снимать автомобиль и при скоростях, в несколько раз превышающих $V_{a\,max}$. В этом случае колесо в киноизображении будет смазано и зритель не сможет оценить частоту его вращения, а скорость движения автомобиля будет определяться зрителем по взаимному смещению изображений автомобиля и других объектов в киноизображении.

4. Изменение конструкций киносъёмочной аппаратуры с целью усиления фильтрации временных частот при дискретизации изображения, т. е. с целью подавления частот в изображении, превышающих $\frac{\nu_c}{2}$, возможно за счёт увеличения времени экспонирования $t_э$ до $t_э > 2T_c$ [16]. Однако обеспечение такого времени экспонирования связано со значительными техническими трудностями. Кроме того, увеличение времени экспонирования приводит к увеличению смаза изображения движущихся объектов киносъёмки.

6.4. КИНОСЪЁМКА ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Телевидение в XX столетии вошло в жизнь каждого человека. Поэтому при создании новых кинофильмов очень часто в интерьере снимаемой сцены присутствует работающий телевизор. А поскольку телевизионное изображение

представляет собой пространственно-временно́й растр, то при киносъёмке, в результате временно́й дискретизации сигналов изображения в киносъёмочном аппарате, возможно появление в записываемом киноизображении искажений первого рода. Знать, как проявляются искажения первого рода, причины их возникновения и при каких условиях может быть обеспечена бездефектная киносъёмка, очень важно для кинооператора.

В телевидении, так же как и в кинематографе, телевизионное изображение записывается, передаётся и воспроизводится с дискретизацией по времени, т. е. в виде отдельных телевизионных кадров.

В отличие от кинематографа, в котором частота кадров 24 кадр/с является общемировым стандартом, в телевидении изначально для упрощения конструкций телевизионных приёмников частота кадров привязывалась к частоте электросети, которая согласно европейским стандартам составляет 50 Гц, а согласно североамериканским стандартам — 60 Гц.

Для того чтобы зритель не воспринимал мигания яркости телевизионного экрана, поскольку изменения яркости с частотами 25 Гц и 30 Гц человеческий глаз видит, в телевидении в условиях ограниченности полосы пропускания канала передачи видеосигнала, каждый кадр выводится на экран телевизора двумя полями (полукадрами). Первым полукадром выводятся все нечётные строки телевизионного кадра, а вторым полукадром — все чётные строки телевизионного кадра. Такая развёртка называется чересстрочной, а её частота измеряется в полукадрах в секунду.

В стандартах телевидения высокой чёткости HD TV применяется прогрессивная развёртка, при которой каждый телевизионный кадр выводится целиком дважды.

С появлением стандарта NTSC цветного телевидения частота вывода полукадров была изменена с 60 Гц на 59,84 Гц.

В последнее время появились телевизионные приёмники премиум-класса с диагональю экрана 72 см и больше, в которых предусмотрен режим «100 Гц». При включении режима «100 Гц» частота вывода телевизионных кадров увеличи-

вается в 2 раза путём повторного показа каждого кадра изображения при удвоенной частоте развёртки.

Для формирования телевизионного изображения в настоящее время наиболее часто используют такие устройства, как: электронно-лучевая трубка (кинескоп — в XX столетии единственное массовое средство визуализации телевизионных изображений), жидкокристаллический, плазменный, светодиодный экран. Рассмотрим каждое из этих устройств воспроизведения изображений.

6.4.1. Киносъёмка интерьера с работающим телевизором на базе электронно-лучевой трубки

Первыми промышленно выпускаемыми устройствами, формирующими телевизионное изображение, были кинескопы. Они и до сих пор используются очень широко, а для воспроизведения чёрно-белых телевизионных изображений — чаще всего.

В кинескопе видимое телевизионное изображение создаётся при воздействии электронного луча на слой люминофора, нанесённого на внутреннюю поверхность колбы. Электронный луч, управление которым осуществляется магнитным полем, создаваемым двумя парами взаимно перпендикулярных отклоняющих катушек, генерирующих чересстрочную развёртку, пробегает построчно по слою люминофора, вызывая его свечение. Важной характеристикой люминофора является затухание яркости свечения после прекращения его возбуждения электронным пучком (рис. 6.4). Из рисунка 6.4 видно, что возбуждение люминофора про-

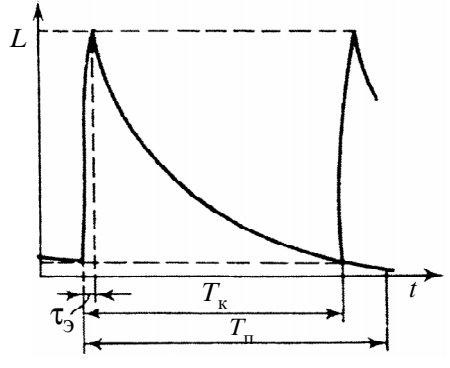


Рис. 6.4. Характеристика послесвечения люминофора [5]:
L — яркость свечения участка люминофора,
$T_к$ — период смены кадра,
$T_п$ — время послесвечения,
$\tau_э$ — время возгорания люминофора

исходит в течение короткого времени воздействия на него электронного луча, а затем следует фаза плавно ослабевающего послесвечения, необходимого для снижения заметности мерцания яркости экрана. К началу следующего возбуждения яркость должна снизиться до величины, обеспечивающей исключение влияния содержания предыдущего кадра на последующий.

Рассмотрим несколько типичных вариантов киносъёмки.

1. Частота киносъёмки 25 кадр/с.

Возьмём частоту телевизионных кадров соответствующей стандарту в европейских странах, в том числе в Российской Федерации, $\nu_т = 25$ Гц. Тогда частота вывода телевизионных полей (полукадров) составит $\nu_п = 50$ Гц.

Использование частоты $\nu_п = 50$ Гц обосновано тем, что критическая частота мельканий, ещё воспринимаемых человеком, составляет $48 \div 50$ Гц. Поэтому, как и в кинематографе, чтобы зритель не видел мельканий кадров, снятых с частотой съёмки $\nu_с = 25$ кадр/с, каждый кадр при демонстрации телевизионных изображений выводится дважды. При этом возможна и чересстрочная (на экран выводятся полукадры, причём под полукадром понимается не половина размера экрана, а половина телевизионных строк — выводятся чётные или нечётные строки), и прогрессивная развёртка телевизионного изображения.

После вывода растра каждого полукадра проходит гасящий кадровый импульс $\tau_{кг}$ (обратный ход электронного луча вертикальной развёртки), длящийся от 1,2 до 2 мс. Будем считать, что $\tau_{кг} = 1{,}6$ мс.

Предположим, что киносъёмка интерьера с работающим телевизором выполняется плёночным киносъёмочным аппаратом с частотой съёмки $\nu_с = 25$ кадр/с, углом раскрытия обтюратора $\alpha_о = 180°$, прямоугольной характеристикой обтюрации и углом предварительного закрытия обтюратора*

* Об угле предварительного закрытия обтюратора подробнее см., например, в [15, 40].

$\beta \le \alpha_{кг} = 360 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-3} \cdot 25 = 14{,}4°$ (под углом предварительного закрытия обтюратора в данном контексте будем понимать угол поворота обтюратора, при котором он начинает и заканчивает перекрытие светового потока, формирующего изображение экрана кинескопа на киноплёнке или матрице), т. е. имеется в виду угол поворота обтюратора за время пересечения рабочей кромкой обтюратора светового потока, идущего от киносъёмочного объектива в ту часть кадра, в пределах которой формируется киноизображение экрана телевизора.

При таких условиях киносъёмки период одного телевизионного полукадра равен времени экспонирования изображения экрана телевизора в киносъёмочном кадре, и если киносъёмочный аппарат синхронизирован с развёрткой телевизионного сигнала, т. е. электропривод киносъёмочного аппарата работает в ведомом режиме с опорой на видеосигнал, то будет произведена бездефектная киносъёмка телевизионного сигнала. Хотя и при этом углы в телевизионном изображении, с которых начинается и заканчивается экспонирование, могут оказаться затемнёнными.

Очевидно, что чем больше размеры изображения экрана кинескопа относительно размеров киносъёмочного кадра, тем труднее обеспечить соблюдение условия $\beta \le 14{,}4°$. Наиболее сложно обеспечить бездефектную киносъёмку, если изображение телевизионного экрана полностью вписано в кадровое окно киносъёмочного аппарата. В этом случае из-за значительного угла предварительного закрытия в изображении телевизионного экрана возникнет одна или две тёмные полосы. Одновременно часть кадра рядом с тёмной полосой будет дополнительно экспонироваться вторым телевизионным полукадром и в результате окажется более светлой.

Уменьшение или увеличение угла раскрытия обтюратора приведёт к увеличению размера тёмной или светлой полосы соответственно.

Итак, оптимальный угол раскрытия обтюратора при рассматриваемых условиях киносъёмки равен $\alpha_o = 180°$, а

угол предварительного закрытия $\beta \le 14{,}4°$. Более подробная информация по выбору допустимых углов α_o и β изложена в [40, 43].

При киносъёмке цифровым киносъёмочным аппаратом с электронным затвором при покадровом снятии информации с матрицы, если экспонирование всех точек кадра начинается и заканчивается одновременно, то угол предварительного закрытия обтюратора $\beta = 0$. Тогда синхронизация киносъёмочного аппарата с развёрткой телевизионного сигнала не нужна.

Время экспонирования в цифровом киносъёмочном аппарате должно составлять $\frac{1}{100}$ секунды.

2. Частота киносъёмки 24 кадр/с.

Теперь предложим, что киносъёмка производится с частотой $\nu_c = 24$ кадр/с.

В результате дискретизации по времени сигнала киноизображения при киносъёмке в спектре дискретного киноизображения появится бесконечное количество смещённых спектров изображения, отстоящих друг от друга на интервалах ν_c. Согласно теореме Котельникова, без искажений передаются только частоты $\nu < \frac{\nu_c}{2}$, т. е. в данном случае частоты $\nu < 12$ Гц. А поскольку частота смены телевизионных полукадров составляет $\nu_п = 50$ Гц, то после дискретизации временно́й спектр сигнала киноизображения телевизионного сигнала содержит бесконечное число временны́х частот $\nu_т^*$, определяемых следующим уравнением:

$$\nu_т^* = \nu_п - n\nu_c, \qquad (6.8)$$

где n — целое число от $-\infty$ до ∞.

Из всех частот $\nu_т^*$ нас интересуют только те, которые имеют минимальное значение по абсолютной величине. В данном случае это частота $\nu_т^* = 2$ Гц, получаемая из уравне-

Рис. 6.5. Пример движущейся в киноизображении экрана телевизора на базе электронно-лучевой трубки чёрной полосы, возникшей в результате дискретизации по времени киноизображения при киносъёмке (киносъёмочный аппарат 1КСР с обтюратором нижнего расположения с углом раскрытия $\alpha_{\circ} = 150°$ при частоте киносъёмки 24 кадр/с)

ния (6.8) при $n = 2$. Действительно, частота 2 Гц соответствует медленному смещению начала развёртки телевизионного растра относительно начала экспонирования кинокадра. В результате в киносъёмочном изображении (если угол раскрытия обтюратора киносъёмочного аппарата $\alpha_{o} < 180°$ или угол предварительного закрытия $\beta \leq 14{,}4°$) зритель увидит в изображении экрана работающего телевизора тёмную полосу (рис. 6.5), которая медленно, с частотой 2 Гц, периодически проходит по экрану телевизора.

Размер тёмной полосы при частоте киносъёмки 24 кадр/с определяется углом раскрытия обтюратора α_{o}, углом предварительного закрытия β, длительностью гасящего кадрового импульса $\tau_{кг}$ и скоростью движения полосы в киноизображении по экрану телевизора, зависящей от соотношения частот $\nu_{с}$ и $\nu_{п}$.

При киносъёмке плёночным киноаппаратом чёрная полоса всегда наклонна. Угол наклона полосы зависит, главным образом, от величины угла предварительного закрытия обтюратора, а также от направления движения кромок обтюратора относительно строк телевизионного растра. Если кромки обтюратора движутся вдоль направления строк телевизионного растра, то наклон полос максимален, и наоборот, если кромки обтюратора движутся перпендикулярно строкам телевизионного растра, то наклон минимален. Направление движения электронного луча от строки к строке относительно направления движения кромки обтюратора определяет, в какую сторону наклонена полоса.

При киносъёмке цифровым киносъёмочным аппаратом с электронным затвором и покадровым переносом информации с матрицы, когда угол предварительного закрытия $\beta = 0$, поэтому чёрная полоса в киноизображении будет параллельна горизонтальным строкам развёртки телевизионного изображения.

При уменьшении угла раскрытия обтюратора ширина полосы будет увеличиваться. Увеличение угла раскрытия обтюратора приведёт сначала к уменьшению ширины тёмной полосы, и затем вместо тёмной полосы появится светлая полоса за счёт частичного наложения на изображение текущего телевизионного полукадра изображения последующего полукадра, смена чёрной полосы на светлую не изменит скорость её движения по экрану телевизора, задаваемую частотой смены положения полосы в 2 Гц.

3. Частота киносъёмки меньше 24 кадр/с.

При уменьшении частоты киносъёмки размер тёмной полосы будет уменьшаться, а при возрастании разницы частот $\nu_с$ и $\nu_п$ начнёт формироваться светлая полоса, прилегающая к тёмной, скорость движения полос по экрану телевизора будет возрастать.

При частоте киносъёмки $\nu_с$ = 20 кадр/с в киноизображении запишутся две, чередующиеся от кадра к кадру, светлые полосы. При кинопроекции такое изображение будет воспри-

ниматься как мигающее в некоторой части поля экрана кинескопа. Дальнейшее уменьшение частоты киносъёмки приведёт к увеличению ширины светлой полосы при изменении направления её движения на противоположное (минимальная по абсолютной величине частота $\nu_т^*$ будет отрицательной). И наконец, при частоте киносъёмки $\nu_с = 16{,}67$ кадр/с полоса окажется неподвижной, занимая примерно половину экрана кинескопа. При дальнейшем уменьшении частоты киносъёмки процесс изменения скоростей и направления движения полосы будет повторяться в рассмотренном выше порядке.

Таким образом, при частотах киносъёмки $\nu_с = \frac{\nu_п}{n}$ телевизионное изображение в кинофильме будет восприниматься следующим образом: одна часть экрана кинескопа будет иметь нормальную освещённость, а вторая часть — более яркую. А при частотах киносъёмки $\nu_с = \frac{\nu_п}{n+0{,}5}$ зритель будет воспринимать телевизионное изображение мигающим по участкам поля экрана кинескопа. Во всех остальных случаях наблюдается движущаяся тёмная или светлая полоса.

4. Частота киносъёмки больше 25 кадр/с.

При увеличении частоты киносъёмки тёмная полоса будет увеличиваться.

При частоте киносъёмки $\nu_с = 33{,}33$ кадр/с положение тёмной полосы будет чередоваться от кадра к кадру, что воспринимается зрителем при кинопоказе как мигающее изображение экрана кинескопа.

При дальнейшем увеличении частоты киносъёмки направление движения полосы изменится на противоположное, скорость её движения станет уменьшаться, а ширина увеличиваться.

И наконец, при киносъёмке с частотой 50 кадр/с только на половине телевизионного экрана кинозритель будет видеть телевизионное изображение, остальная часть экрана телевизора всегда будет тёмной.

5. Частота телевизионных кадров 60 кадр/с.

Эта частота соответствует американскому стандарту телевидения. При киносъёмке такого телевизионного изображения киносъёмочным аппаратом с частотой 24 кадр/с, согласно уравнению (6.8), в киноизображении появятся ложные частоты, равные ±12 Гц. Это означает, что на соседних кинокадрах будет формироваться чередующееся от кадра к кадру положение светлой полосы, что при кинопоказе будет восприниматься зрителем как мигание яркости участков изображения экрана кинескопа.

6. Телевидение высокого качества.

Для улучшения качества телевизионного изображения вместо стандартного разложения телевизионного кадра на 625 строк (европейский стандарт) или 525 строк (американский стандарт) используют разложение на 1125 и 1250 строк (стандарты ТВЧ). Однако количество строк в телевизионном кадре — характеристика пространственной дискретизации киноизображения, которая на временну́ю дискретизацию никак не влияет. Поэтому увеличение количества строк в телевидении высокого качества и изменение формата кадра ничего принципиально в рассматриваемом вопросе не меняет.

Изменения могут произойти только при повышении частоты вывода телевизионных растров, которое особенно необходимо при наблюдении телевизионных изображений больших размеров с малых расстояний. При этом тип развёртки — чересстрочная или прогрессивная — значения не имеет. Технически повышение частоты в телевидении высокого качества осуществляется за счёт применения мультиплексоров, повышающих частоту воспроизведения изображения в два раза.

В этом случае, если частота телевизионных кадров составляет 100 Гц, а киносъёмка осуществляется с частотой 24 кадр/с, то в киноизображении экрана кинескопа, согласно уравнению (6.8), появится минимальная ложная частота, равная 4 Гц. Каждый киносъёмочный кадр будет экспонироваться двумя полными телевизионными растрами и небольшой частью третьего телевизионного растра. Поэтому кино-

изображение телевизионного сигнала будет восприниматься почти как бездефектное, хотя и имеющее слегка светлую или тёмную (в зависимости от значения угла раскрытия и угла предварительного закрытия обтюратора) полосу, движущуюся со скоростью, задаваемой частотой смены положения полосы в 4 Гц.

6.4.2 Киносъёмка интерьера с работающим жидкокристаллическим экраном

Жидкокристаллический экран представляет собой матрицу, одиночный элемент которой показан на рис. 6.6. Свет *1* направляется на поляризационный фильтр *3*, который пропускает только часть света, поляризованную в одной плоскости. Этот поляризованный свет попадает на жидкокристаллический материал 7, который поворачивает плоскость поляризации света на 90°. А поскольку плоскость поляризации выходного поляризационного фильтра *3* (на рис. 6.6 правый) развёрнута относительно входного поляризационного филь-

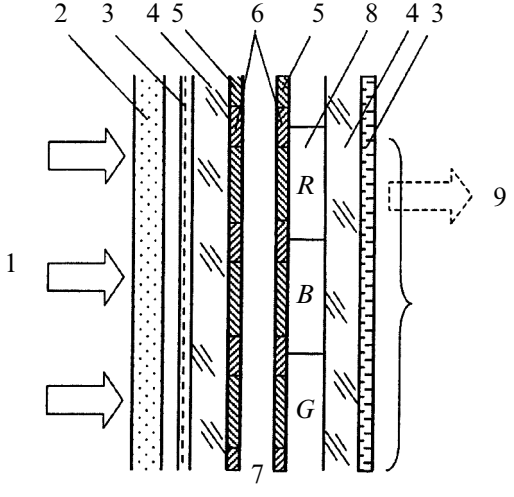


Рис. 6.6. Принцип работы жидкокристаллического экрана [5]:
1 — световой поток, 2 — рассеиватель, 3 — поляризационный фильтр, 4 — стекло, 5 — полупрозрачные электроды, 6 — электроды адресации и управления, 7 — жидкокристаллический материал, 8 — цветные светофильтры, 9 — элемент изображения

тра также на 90°, то свет практически без потерь проходит через выходной поляризационный фильтр. Если же на полупрозрачные электроды *5* подать какой-либо электрический потенциал, то жидкокристаллический материал изменит угол поворота плоскости поляризации света, в результате чего новая плоскость поляризации света будет отличаться от плоскости поляризации выходного поляризационного фильтра *3*, и следовательно, изменится количество света, проходящего через данный элемент матрицы жидкокристаллического экрана.

Управляя разностью потенциалов между полупрозрачными электродами *5*, можно осуществлять модуляцию светового потока. При этом свет, проходящий через элемент матрицы жидкокристаллического экрана, постоянен в течение длительности одного телевизионного растра и изменяется практически мгновенно при переходе к следующему растру.

В жидкокристаллических экранах весь кадр выводится на экран телевизора целиком одномоментно. Согласно европейскому телевизионному стандарту частота вывода телевизионных кадров составляет $\nu_п = 50$ Гц, а согласно американскому — $\nu_п = 60$ Гц.

Поэтому в киноизображении работающих жидкокристаллических экранов могут возникать и пространственные искажения первого рода, и временны́е искажения первого рода будут проявляться в восприятии зрителя как мигание яркости телевизионных экранов, частота этого мигания определяется из уравнения (6.8).

Например, если киносъёмка производится с частотой $\nu_с = 24$ кадр/с в европейской стране, то временна́я частота мигания экрана в киноизображении составит 2 Гц и зритель её увидит. Если же киносъёмка выполняется в североамериканской стране, то временна́я частота мигания экрана в киноизображении будет больше: 12 Гц.

Цифровые экраны, в том числе жидкокристаллические, могут иметь и бо́льшую частоту обновления кадров. В этом случае методика оценки искажений не изменяется, с помо-

щью формулы (6.8) всегда можно рассчитать ложные частоты в спектре дискретного сигнала киноизображения.

В жидкокристаллических экранах свет, излучаемый источником света в телевизоре и направляемый изнутри на матрицу телевизора, может иметь собственную частоту мигания, превышающую частоту телевизионных кадров. В этом случае анализ частоты мигания жидкокристаллического экрана в киноизображении, возникающего в результате дискретизации киноизображения по времени, выполняется под обе исходные частоты: частоту вывода на экран телевизионных кадров и частоту мигания света в оптической системе телевизора.

6.4.3. Киносъёмка интерьера с работающим плазменным экраном

Плазменные экраны, как и жидкокристаллические, представляют собой матрицу, каждый элемент которой работает следующим образом. К прозрачным для света электродам *2* (правым на рис. 6.7) подводится напряжение, в результате чего между ними происходит поверхностный разряд, приводящий к ионизации газа и образованию плазмы *4*, которая, как известно, является источником ультрафиолетового излу-

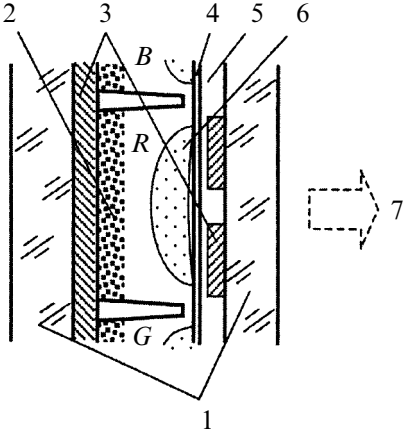


Рис. 6.7. Принцип работы плазменного экрана [5]:
1 — стекло, 2 — люминофор, 3 — электроды адресации и управления, 4 — защитный слой, 5 — диэлектрик, 6 — плазма, 7 — элемент изображения

чения. Воздействие ультрафиолетового излучения на люминофор приводит к его свечению в области красного, зелёного и синего цвета (в зависимости от материала люминофора), которое и формирует элемент *7* выходного изображения.

В такой конструкции плазменного экрана яркость каждого элемента матрицы остаётся постоянной. Модуляция интегральной яркости свечения элемента матрицы в пределах одного телевизионного растра, и следовательно, формирование полутонов в телевизионном изображении, осуществляется за счёт изменения времени свечения элемента матрицы. Таким образом, элементы матрицы плазменного экрана начинают излучать свет после подачи необходимого напряжения на электроды адресации и управления, но светят они разное время: элементы матрицы, соответствующие наиболее ярким участкам телевизионного изображения, светятся практически в течение всего времени телевизионного кадра, а элементы матрицы, соответствующие тёмным участкам телевизионного изображения, светятся очень короткое время.

Поэтому при киносъёмке телевизионного изображения, формируемого плазменным экраном, в результате дискретизации изображения по времени будут возникать временны́е искажения киноизображения, проявляющиеся в мигании яркости изображения плазменного экрана. Мигание яркости будет аналогичным миганию яркости жидкокристаллического экрана.

Кроме того, поскольку яркость элементов матрицы плазменного экрана формируется временем свечения элемента матрицы, то при малых углах раскрытия обтюратора киносъёмочного аппарата или малом времени экспонирования в цифровом киносъёмочном аппарате могут измениться соотношения яркостей объектов телевизионного изображения, записанного в киноизображении в процессе киносъёмки.

6.4.4. Киносъёмка интерьера с работающим светодиодным экраном

Светодиодный экран это устройство визуализации информации, в котором в качестве пикселя используется один или несколько полупроводниковых светодиодов.

В торговых организациях нередко «LED-телевизорами» называют телевизоры с жидкокристаллическим экраном, оснащённым светодиодной подсветкой. Такие телевизоры с позиций рассматриваемого в данной книге аспекта, конечно же, относятся к жидкокристаллическим (см. раздел 6.4.2).

Частота вывода кадров у светодиодных экранов составляет от 60 Гц до 120 Гц. В настоящее время выполняются разработки, направленные на увеличение частоты вывода кадров до 240 Гц.

Для оценки искажений первого рода, возникающих при киносъёмке работающих светодиодных экранов, достаточно узнать частоту вывода кадров светодиодного экрана. Затем по формуле (6.8) легко рассчитать частоту мигания яркости светодиодного экрана в киноизображении.

Выводы

1. При киносъёмке (если в кадре присутствует работающий телевизор, сконструированный на базе электронно-лучевой трубки) почти всегда происходит искажение телевизионного изображения в кинофильме, проявляющееся в виде появления неподвижных или движущихся по экрану телевизора тёмных или светлых полос, мигания участков или целиком всего телевизионного изображения, пропадания части телевизионного изображения. Полностью устранить появление этих дефектов при использовании существующих технических средств киносъёмки и воспроизведения телевизионного изображения невозможно.

2. Оптимальные параметры киносъёмочного аппарата для проведения бездефектной киносъёмки телевизионных экранов на базе электронно-лучевой трубки — угол раскрытия обтюратора $\alpha_o = 180°$ и угол предварительного закрытия изображения телевизионного экрана на кинокадре $\beta \le 14{,}4°$.

3. Оптимальным соотношением частоты киносъёмки и частоты вывода полукадров в телевизионном сигнале является

$$\nu_{c\,опт} = n\nu_c, \qquad (6.9)$$

где n — целое положительное число.

4. Оптимальный угол раскрытия обтюратора при киносъёмке интерьера с работающим телевизионным экраном равен

$$\alpha_{\text{о опт}} = \frac{360 n \nu_{\text{с}}}{\nu_{\text{п}}}. \qquad (6.10)$$

Из уравнения (6.10) следует, что при частоте $\nu_{\text{п}} = 50$ Гц оптимальные значения угла раскрытия обтюратора следующие:

— если $\nu_{\text{с}} = 25$ кадр/с, то $\alpha_{\text{о опт}} = 180°$;

— если $\nu_{\text{с}} = 24$ кадр/с, $\alpha_{\text{о опт}} = 172{,}8°$;

— если $\nu_{\text{с}} = 12$ кадр/с, $\alpha_{\text{о опт}} = 86{,}4°; 172{,}8°; 259{,}2°; 345{,}6°$ (с учётом других требований принимаем $\alpha_{\text{о опт}} = 172{,}8°$).

Если же $\nu_{\text{п}} = 60$ Гц (североамериканский стандарт), то при $\nu_{\text{с}} = 25$ кадр/с оптимальные значения угла раскрытия обтюратора $\alpha_{\text{о опт}} = 150°; 300°$, а при $\nu_{\text{с}} = 24$ кадр/с — $\alpha_{\text{о опт}} = 144°; 288°$.

5. При киносъёмке интерьера с работающим цифровым телевизором возможно появление искажений, вызванных дискретизацией сигнала киноизображения по времени в процессе киносъёмки, проявляющихся в заметном зрителю мигании яркости экрана телевизора в киноизображении. Для исключения рассматриваемых искажений в киноизображении достаточно применять оптимальные значения выдержки:

$$t_{\text{экс}} = \frac{n}{\nu_{\text{т}}}, \qquad (6.11)$$

где $\nu_{\text{т}}$ — частота вывода телевизионных кадров или частота мигания света в оптической системе цифрового телевизора.

6.5. КИНОСЪЁМКА ИНТЕРЬЕРА С РАБОТАЮЩИМИ КОМПЬЮТЕРНЫМИ МОНИТОРАМИ

Монитор это устройство, предназначенное для визуализации видеосигнала и другой информации, поступающей от компьютера, для просмотра её пользователем. Если телеви-

зор предназначен для воспроизведения телевизионного сигнала эфирного телевещания или поступающего по кабельным каналам, или считываемого с тех или иных носителей информации, всегда соответствующего телевизионным стандартам, то компьютерный монитор является комплектующим элементом любого компьютера, предназначенного для выполнения самых разнообразных функций. Поэтому стандарты видеосигнала, в том числе стандарты разложения видеоинформации, частоты обновления информации на экране монитора и т. д. не совпадают с телевизионными и могут быть разными в разных конструкциях мониторов.

Как правило, компьютерные мониторы обладают более высокой строчной и кадровой частотой и чёткостью, чем стандартные телевизоры. Тем не менее, телевизор тоже может быть использован в качестве монитора.

Существующие компьютерные мониторы классифицируют:

— по способу вывода информации (растровые и векторные);

— по принципу формирования изображения (на основе электронно-лучевой трубки, жидкокристаллические, плазменные, светодиодные).

В рамках рассматриваемой темы важны две характеристики мониторов: частота обновления видеоинформации на экране монитора и частота колебаний светового потока, генерируемого оптической системой монитора. В конструкциях мониторов эти две частоты могут совпадать (например, в мониторах, построенных на основании электронно-лучевой трубки), но могут и отличаться (например, в жидкокристаллических дисплеях).

Величина частоты обновления видеоинформации на экране монитора обычно выбирается пользователем из следующих вариантов: 60, 72, 75, 80, 85, 100, 120, 140, 160, 180, 200 Гц. Возможны и другие значения частоты обновления видеоинформации на экране монитора, например 64 Гц. Закрепление выбранной частоты обновления видеоинформации на экране монитора производится в настройках операцион-

ной системы. Диапазон допустимых значений частоты обновления видеоинформации на экране монитора для каждой конкретной конфигурации компьютера свой и зависит от параметров используемого монитора и видеокарты.

Поэтому, для расчёта условий бездефектной киносъёмки интерьера с работающим компьютерным монитором, необходимо предварительно узнать частоту обновления видеоинформации на экране монитора и затем рассчитать по формуле (6.11) необходимое время экспонирования киносъёмочного кадра, при котором искажений первого рода в киноизображении возникать не будет.

Если в киносъёмочный кадр попадает несколько мониторов (например, киносъёмка в компьютерном классе или в офисе), то чаще всего оказывается, что мониторы настроены на разные частоты обновления видеоинформации на экране мониторов. В этом случае обеспечить бездефектную киносъёмку не представляется возможным.

Если снимаемая сцена включает жидкокристаллический или светодиодный монитор, то у него могут быть пульсации света с частотой, превышающей частоту обновления видеоинформации на экране монитора. В этом случае для обеспечения бездефектной киносъёмки необходимо учитывать обе частоты сигнала изображения, излучаемого монитором, и расчёты производить под обе частоты, но в результате не всегда удаётся одновременно фильтровать обе эти временны́е частоты. Тогда в киноизображении проявятся искажения первого рода в виде мигания яркости экрана монитора или его отдельных участков.

7. ЦВЕТОВЫЕ ИСКАЖЕНИЯ ЦИФРОВЫХ КИНОИЗОБРАЖЕНИЙ

В существующем профессиональном кинематографе осуществить развёртку сигнала киноизображения по длине волны света не представляется возможным. Поэтому информация о длине волны света при киносъёмке либо теряется (так происходит при киносъёмке на чёрно-белую киноплёнку), либо должна подвергнуться дискретизации.

Выполнить дискретизацию сигнала киноизображения по длине волны света технически крайне сложно, кроме того, такая операция существенно увеличит объём записываемой при киносъёмке информации. Выход был найден, когда стало понятно, что не обязательно воссоздавать физически точное киноизображение, а достаточно физиологически точного киноизображения, т. е. такого киноизображения, при просмотре которого человек будет воспринимать цвет так же, как при рассматривании реальных объектов.

Известно, что у человека имеется два типа фоторецепторов (светочувствительные клетки в сетчатке глаза) — палочек и колбочек. Палочки, обладая высокой светочувствительностью, по сравнению с колбочками, определяют сумеречное и ночное зрение человека. Каждая палочка может воспринять фотоны всего диапазона видимого света, поэтому палочки чувствительны к силе света и предоставляют мозгу зрительную информацию, на основании которой мозг может выстроить только чёрно-белое представление об объектах окружающего мира.

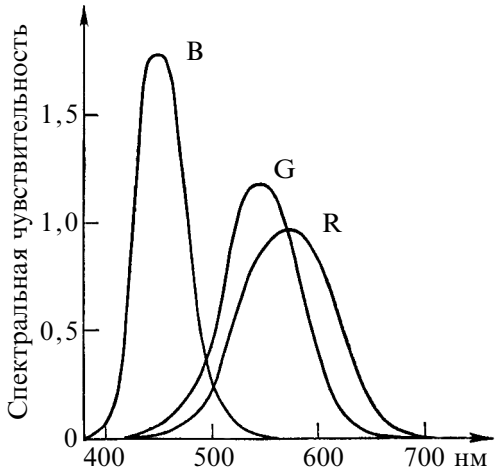


Рис. 7.1. Спектральная чувствительность колбочек нормальной сетчатки человеческого глаза (данные Е.Н. Юстовой (1993) по [50]):

R — красночувствительные колбочки, т. е. колбочки, способные поглотить фотоны с длиной волны от 470 нм до 700 нм; в зарубежной литературе чаще применяют название «длинноволновые колбочки» (longware — L);

G — зелёночувствительные колбочки, способные поглотить фотоны с длиной волны от 450 нм до 650 нм; в зарубежной литературе — «средневолновые колбочки» (middleware — M);

B — синечувствительные колбочки, способные поглотить фотоны с длиной волны от 380 нм до 510 нм; в зарубежной литературе — «коротковолновые колбочки» (shortware — S)

Колбочки являются основой зрительного аппарата дневного зрения человека. Существует три типа колбочек, различающихся между собой спектральной чувствительностью (рис. 7.1). Колбочки разных типов, как и палочки, чувствительны к силе света, но диапазоны длин волн фотонов, воспринимаемых ими, у колбочек разного типа разные. Поэтому от колбочек поступает световая информация, зависящая от спектрального состава попадающего на них света. Наличие такой информации позволяет мозгу выстраивать представление о цвете объектов, благодаря которому наблюдаемые человеком объекты лучше им различаются.

Максимальные спектральные чувствительности колбочек нормальной сетчатки человеческого глаза соответствуют следующим примерным значениям длин волн: 565 нм для R-колбочек, 540 нм для G-колбочек и 440 нм для B-колбочек [9].

На факте, что в сетчатке глаза человека три типа колбочек, построена трёхрецепторная теория цветового зрения Гельмгольца, из которой следует, что цветность любой длины волны можно получить, смешивая в определённых пропорциях три монохроматических цвета из разных участков длин волн диапазона видимого света. Использовать для этого приведённые выше длины волн, соответствующие максимальным спектральным чувствительностям колбочек, сложно, поскольку спектральные чувствительности R-колбочек и G-колбочек расположены относительно близко друг к другу (см. рис. 7.1). Кроме того, длина волны 565 нм соответствует в восприятии человека жёлтому цвету. Поэтому Международная комиссия по освещённости приняла за основные цвета спектра красный, зелёный и синий, максимумы чувствительности глаза к этим цветам соответствуют длинам волн, равным 605, 545 и 445 нм.

Таким образом, учитывая физиологию зрения человека, приходим к выводу, что не обязательно проводить дискретизацию сигналов киноизображения по длине волны света так, как это делается при дискретизации сигнала киноизображения по времени и по пространственных координатам в цифровом киносъёмочном аппарате. Достаточно разбить весь диапазон длин волн видимого света на три участка и записать световые сигналы в пределах каждого из этих участков длин волн. В результате такой дискретизации сигналов киноизображения по цвету искажения первого рода возникнуть не могут. Однако проявятся другие искажения, связанные с тем, что у разных средств визуализации киноизображения спектральные характеристики разные, к тому же они отличаются от спектральных характеристик светофильтров, используемых в киносъёмочных аппаратах для разделения светового потока (сформированного киносъёмочным объективом и

направляемого им на светочувствительный слой матрицы) по спектру на три составляющие (например, фильтр Байера). В этом одна из причин необходимости проведения цветокоррекции киноизображения в послесъёмочном периоде (в постпродакшен), причём цветокоррекцию следует производить под те средства визуализации, с помощью которых кинофильм будет демонстрироваться зрителям.

8. ДИСКРЕТИЗАЦИЯ ЗВУКА В ЦИФРОВЫХ АКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Современное кино немыслимо без сопровождения киноизображения речью, музыкой, звуковыми эффектами (шумами). Кинематографические образы воздействуют одновременно и на органы зрения, и на органы слуха зрителя. Поэтому, рассматривая преобразования сигнала киноизображения в кинематографе, нельзя оставить в стороне вопросы записи, преобразования и воспроизведения звука в цифровых кинотехнологиях, в которых также производится дискретизация звуковых сигналов, а следовательно, возможно появление искажений звука первого рода.

8.1. ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ЗВУКА

Звук — это колебательное движение частиц упругой среды, распространяющееся в виде волн в газообразной, жидкой или твёрдой средах. Колебательные движения частиц среды инициируются источниками звука, которыми могут быть любые явления, вызывающие местное изменение давления или механического напряжения. Например, колебания камертона возбуждают вокруг себя колебания частиц воздуха, т. е. вызывают колебания давления в воздухе, окружающем камертон. Давление в воздухе изменяется во времени в соответствии с пространственными перемещениями ножек камертона. Возникшие зоны сгущения воздуха (местное повышенное давление воздуха) и разрежения (местное пониженное давление воздуха) начинают передаваться от области, прилегающей к камертону, к соседним областям воздуха и тем

самым распространяться в воздухе во всех направлениях, образуя сферическую пространственную волну (рис. 8.1). Колебания давления воздуха, вызванные механическими колебаниями камертона, и есть звук, распространяющийся в виде волн давления.

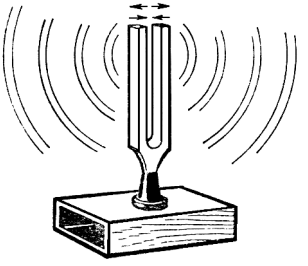


Рис. 8.1. Распространение звука от колебаний камертона

Распространение звука характеризуется скоростью звука, которая в сухом воздухе при нормальном атмосферном давлении и температуре 0 °С составляет 330 м/с [13] и меняется при изменении атмосферного давления, температуры, влажности воздуха. Так, если температура воздуха поднимется до +20 °С, то скорость звука будет равна 343 м/с [3, 7]. В пресной воде при температуре воды 17 °С скорость звука в 4 раза больше: 1430 м/с [3, 7, 13]. Ещё больше скорость звука в металлах.

Небольшая скорость звука в воздухе, по сравнению со скоростью света, приводит к запаздыванию акустического сигнала относительно светового. Например, если экран и громкоговоритель находятся от зрителя на расстоянии 50 м, то звук будет запаздывать относительно света на 0,15 с.

В процессе распространения звук затухает. Затухание звука обуславливается рядом факторов, зависящих от характеристик самого звука (прежде всего от формы звуковой волны и от частоты звуковых колебаний) и от свойств среды, в которой он распространяется. Например, звук, излучаемый камертоном (см. рис. 8.1), распространяется во все стороны, т. е. камертон возбуждает сферическую звуковую волну. Фронт такой звуковой волны является сферической поверхностью, площадь которой пропорциональна квадрату радиуса сферической поверхности. Если предположить, что количество звуковой энергии в звуковой волне неизменно (закон сохранения энергии) и что поглощения звука в среде распространения нет, то поверхность сферы фронта, расходящегося от камертона, будет увеличиваться пропорциональ-

но квадрату расстояния фронта от камертона. Тогда интенсивность звука также будет уменьшаться пропорционально квадрату расстояния до камертона. Из этого следует, что интенсивность звука камертона на расстоянии 10 м от камертона будет в 100 раз меньше, чем на расстоянии 1 м от камертона. А с учётом поглощения звука в среде распространения из-за перехода части колебательной энергии в тепловую уменьшение интенсивности звука будет ещё бóльшим.

Звуковую волну можно представить в виде частотной характеристики — её спектра, получаемого в результате разложения звука на простые гармонические колебания. В воздухе могут распространяться звуковые волны с частотами до 10^9 Гц, причём, чем больше частота звука, тем быстрее звук затухает.

Если в процессе распространения звуковая волна встретит на своём пути поверхность раздела двух физических сред, то произойдёт её отражение и преломление (как и у света).

Отражённая часть звуковой волны пойдёт в новом направлении, пока не встретит новую границу раздела двух физических сред, на которой снова часть звуковой волны отразится, а часть преломится. В итоге всё пространство, в котором распространяется звук (например, пространство объектов киносъёмки), оказывается заполненным сложным распределением различных звуковых волн, причём поскольку звуковые волны это колебательный процесс, то звуковым волнам присущи все волновые свойства (как и свету), в том числе дифракция и интерференция.

Область пространства, в которой распространяются звуковые волны, называется звуковым полем. Записать при киносъёмке реальное звуковое поле, существующее на съёмочной площадке, в настоящее время технически невозможно, точно так же, как невозможно сегодня записать световое поле (см. главу 1). Более того, в этом нет необходимости, поскольку, с одной стороны, при киносъёмке присутствуют посторонние шумы и звуки, а, с другой — для создания кинематографических образов и для усиления воздействия этих

образов на зрителя в послесъёмочный период производится звуковое оформление кинофильмов. Как правило, озвучиванию (записи речи, шумов и музыки) подлежат кадры, снятые в неблагоприятных акустических условиях, либо с иноязычными актёрами; кадры, требующие шумового оформления или музыкального сопровождения, пояснительного текста и комментариев. Поэтому преобразование звука в технологической цепочке фильмопроизводства рассматривается как «процесс коммуникации воспринимаемого качества источников первичного поля с целью формирования соответствующего воспринимаемого качества у слушателя» [21].

8.2. НЕОБХОДИМЫЙ МИНИМУМ СВЕДЕНИЙ О СЛУХОВОМ ВОСПРИЯТИИ ЧЕЛОВЕКА

Звук является информацией об окружающем мире, которую человек воспринимает органами слуха. В этом случае под звуком понимается физическое явление, субъективно воспринимаемое ухом человека.

Под воздействием звуков у человека возникает специфическое слуховое ощущение, в котором субъективно отражаются параметры звуковых сигналов. Человек не просто слышит звук, т. е. регистрирует его наличие, но и определяет высоту звука, его громкость, длительность и направление на источник звука благодаря бинауральному эффекту. Воспринимаемая человеком громкость звука соответствует объективному параметру звука — его интенсивности, а воспринимаемая высота звука зависит от частоты звуковых колебаний. Человек слышит звук с частотой от 16 Гц до 20 кГц, что существенно меньше всего возможного в природе диапазона звуковых частот. Границы приведённых воспринимаемых человеком частот носят условный характер, поскольку ухо человека наименее чувствительно к граничным частотам указанного диапазона, и с возрастом слух деградирует, особенно если человеку приходится подолгу воспринимать громкие звуки, особенно такие, которые по своей интенсивности приближаются к болевому порогу восприятия.

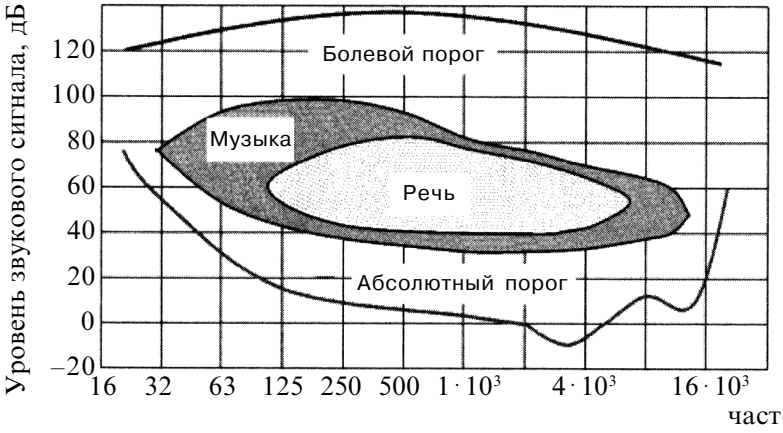


Рис. 8.2. Область слышимых человеком звуков по уровню звука и его частоте [7]

На рис 8.2 показана область слышимых человеком звуков. Сверху отмечен болевой порог, т. е. уровень звуковых сигналов, при которых человек начинает чувствовать боль в ухе, а снизу — абсолютный порог слышимости, т. е. минимальный уровень звука, который ещё способно воспринять человеческое ухо при отсутствии мешающих звуков.

В рамках рассматриваемого вопроса ограничимся приведёнными сведениями о звуке и слухе. Желающим подробнее ознакомиться с материалами по акустике рекомендуем, например, следующую литературу [3, 7].

8.3. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЗВУКОВОГО СИГНАЛА В ЦИФРОВЫХ АКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Цифровая запись звука основана на регистрации с помощью микрофонов аналогового звукового сигнала с последующей дискретизацией звуковых сигналов по времени и переводом дискретных звуковых сигналов в цифровой формат.

Как следует выбирать частоту дискретизации звукового сигнала? Конечно же, необходимо воспользоваться теоремой Котельникова. Но какова максимальная частота в спектре звукового сигнала? Как показано в разделе 8.1, максимальная частота в спектре звукового сигнала, распростра-

няющегося в воздухе, может доходить до 10^9 Гц. Принять частоту дискретизации в 2 раза большей (10^{18} Гц) — технически реализовать невозможно, да и излишне, поскольку человек может услышать звук с максимальной высотой, соответствующей частоте 20 кГц. Поэтому частоту дискретизации можно снизить до 40 кГц. Однако при такой частоте дискретизации могут возникать искажения первого рода, т. е. в спектре дискретного сигнала появятся ложные низкочастотные составляющие, которых не было в спектре исходного сигнала и которые хорошо слышит человек. В результате звук исказится.

Чтобы искажения первого рода не возникали, необходимо до дискретизации звуковой сигнал пропустить через фильтр низких частот прямоугольной формы с частотой среза в 20 кГц. Поскольку фильтр низких частот должен иметь очень крутой срез, обеспечивающий удаление высоких гармоник перед дискретизацией, то такой фильтр является сложным и дорогим. Поэтому обычно используется частота дискретизации, превышающая 40 кГц (например, 44,1 кГц), позволяющая применить недорогой фильтр с плоской передаточной характеристикой вплоть до 20 кГц, но с большим затуханием (до 60 дБ) на частоте 21 кГц, чтобы сделать неслышимыми, ниже порога абсолютной слышимости, возможные ложные частоты, возникающие как искажения первого рода.

В результате дискретизации в спектре дискретного сигнала возникает множество ложных спектров, полностью повторяющих исходный спектр, но сдвинутых от него на интервалы, кратные частоте дискретизации (см. раздел 3.4). Поэтому для прослушивания цифровой записи звука двоичные числа с помощью цифро-аналоговых преобразователей превращаются в последовательность электрических импульсов, амплитуды которых соответствуют значениям дискретных сигналов, т. е. формируется амплитудно-модулированная последовательность импульсов, которую сглаживают, пропуская её через фильтр низких частот с частотой среза в 2 раза меньшей частоты дискретизации, и тем самым восста-

навливают исходный аналоговый непрерывный звуковой сигнал.

Кроме того, для уменьшения искажений до цифро-аналогового преобразования ставят фильтр-передискретизатор, который производит кратное увеличение частоты дискретизации по сравнению со значением, использованном при записи звукового сигнала. Благодаря передискретизации расстояние между соседними спектрами в дискретном сигнале увеличивается и для подавления искажений ступенчатой кривой, получаемой после цифро-аналогового преобразователя становится возможным использование аналоговых фильтров низких порядков. Так, при 8-кратной перелискретизации достаточно применять фильтр низких частот 3-го порядка.

ВЫВОДЫ

1. В звукозаписывающем канале акустической системы звуковой сигнал подвергается фильтрации, удаляются часты, превышающие 20 кГц, для исключения вероятности появления искажений звука первого рода.

2. Частота дискретизации звукового сигнала выбирается согласно теореме Котельникова и техническим возможностям реализации входного фильтра низких частот.

3. При восстановлении аналогового звукового сигнала из цифрового производится фильтрация частот, превышающих 20 кГц, для исключения возможности появления искажений звука второго рода.

9. КВАНТОВАНИЕ ДИСКРЕТНЫХ СИГНАЛОВ

В предыдущих главах рассмотрены причины, приводящие к необходимости дискретизации сигналов киноизображения и звука в кинематографе, и проанализированы искажения, вызываемые дискретизацией.

В результате дискретизации получают дискретный сигнал — набор числовых значений сигнала, характеризующих входной непрерывный сигнал через постоянные промежутки, т. е. через шаг дискретизации.

В качестве примера, рассмотрим киносъёмку интерьера, освещаемого безинерционными источниками света, при частоте электрического тока, питающего источники света, 50 Гц. Тогда световой поток от источников света будет мигать с частотой 100 Гц (рис. 9.1). Отметим, что на рис. 9.1 приведён упрощённый график изменения яркости источников света, в реальности он немного сглаживается и не доходит до нулевых значений. Предположим, что амплитуда колебаний яркости света составляет 50 кд/м^2.

Пусть киносъёмка происходит с частотой 24 кадр/с, выдержкой $\frac{1}{60}$ с, а характеристика обтюрации — прямоугольная. Предположим, что начало экспонирования первого кадра совпало с нулевой яркостью лампы (данное предположение не принципиально, если начало экспонирования первого кадра не совпадает с нулевой яркостью лампы, то качественные результаты дискретизации будут такими же, какие приведены ниже, изменятся только значения экспозиции в каждом кадре).

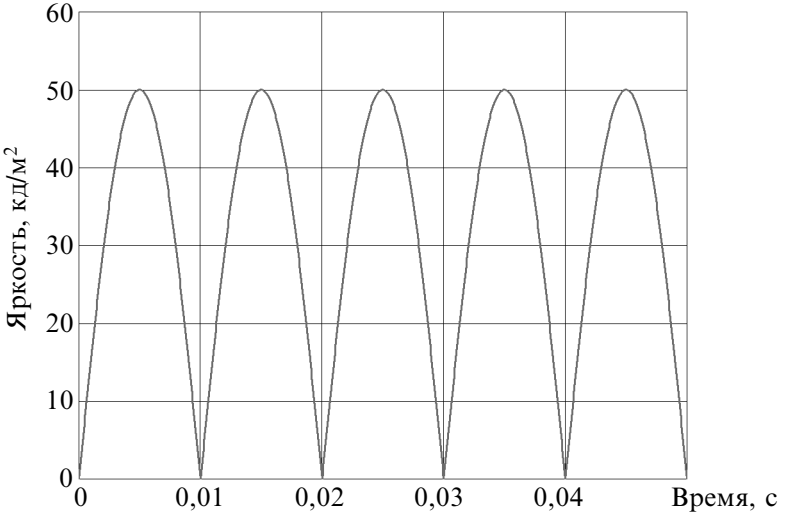


Рис. 9.1. Пример изменения яркости безинерционных ламп при частоте электрического тока 50 Гц

В результате киносъёмки получим относительные значения экспозиции в серии кадров, приведённые в таблице 9.1 (значения рассчитываются интегрированием яркости ламп в течение времени экспонирования каждого кадра).

Из представленных в таблице 9.1 значений относительной экспозиции в кадрах можно сделать следующие выводы.

1. Последовательность относительных экспозиций в кадрах является периодической, так как значения экспозиции повторяются через каждые 6 кадров, т. е. частота мигания яркости в киноизображении составит $\frac{24}{6}=4$ Гц, что соответствует данным, полученным в разделе 4.2.

2. Изменение яркости в дискретном киноизображении составляет 20%. Такие изменения яркости зритель воспримет как визуально неприятный дефект киноизображения — мигание яркости на экране.

Полученный дискретный сигнал киноизображения — это значения экспозиции, но не в виде непрерывной функции, как на рис. 9.1, а в виде набора отдельных значений.

Таблица 9.1

Расчётные значения относительной экспозиции в кадрах, полученных при следующих условиях: освещение безинерционными источниками света, питаемыми от сети электрического тока с частотой 50 Гц; киносъёмка с частотой 24 кадр/с, выдержкой 1/60 с, прямоугольной характеристикой обтюрации

Номер кадра	Относительная экспозиция	Номер кадра	Относительная экспозиция	Номер кадра	Относительная экспозиция	Номер кадра	Относительная экспозиция
1	0,5570	4	0,4988	7	0,5570	10	0,4988
2	0,5940	5	0,4775	8	0,5940	11	0,4775
3	0,5570	6	0,4988	9	0,5570	12	0,4988

Для перевода полученных дискретных значений относительной экспозиции в цифровые сигналы используем, в качестве примера, 8-разрядные двоичные коды, которые позволяют записать $2^8 = 256$ значений. Предположим, что при разных яркостях источников света дискретные значения относительной экспозиции могут быть от 0 до 1. Тогда в случае равномерного линейного квантования из всего диапазона относительных экспозиций могут быть записаны только 256 значений относительной экспозиции, т. е. шаг квантования в рассматриваемом случае составляет $\frac{1}{256}$ диапазона относительных экспозиций. Поскольку величины дискретных сигналов почти всегда отличаются от допустимых 256 значений, то каждый дискретный сигнал необходимо привести к допустимому значению (уровню квантования). Это можно сделать приведением значения дискретного сигнала к ближайшему допустимому уровню квантования или к ближайшему минимальному уровню квантования. В таблице 9.2 приведены значения уровней квантования рассчитанных выше значений относительной экспозиции.

Таблица 9.2

Пример перевода в цифровые сигналы дискретных сигналов относительной экспозиции, полученных при следующих условиях: освещение безинерционными источниками света, питаемыми от сети электрического тока с частотой 50 Гц; киносъёмка с частотой 24 кадр/с, выдержкой 1/60 с, прямоугольной характеристикой обтюрации; 8-разрядное квантование по уровню с приведением значения дискретного сигнала к ближайшему уровню квантования

Дискретные значения	Значение ближайшего уровня квантования	Шум квантования	Номер уровня квантования	Цифровой сигнал
0,5570	0,5586	0,0016	143	10001111
0,5940	0,5938	0,0002	152	10011000
0,5570	0,5586	0,0016	143	10001111
0,4988	0,5000	0,0012	128	10000000
0,4775	0,4766	0,0009	122	01111010
0,4988	0,5000	0,0012	128	10000000

Разница между истинными значениями дискретного сигнала и значениями ближайшего уровня квантования называются шумом квантования. Очевидно, чем больше разрядность цифрового сигнала, тем меньше шум квантования.

В цифровом формате хранится не значение дискретного сигнала и не значение сигнала, соответствующего какому-то уровню квантования, а номер уровня квантования. Поэтому в нашем примере первый дискретный сигнал относительной экспозиции 0,5570 переведём в значение, кратное шагу квантования: 0,5570*256=142,592. Ближайшим к полученному значению является 143-й уровень квантования. Погрешность перехода истинного значения к значению ближайшего уровня

квантования составила $\frac{0,5586-0,5570}{0,5570}\cdot 100\% = 0,29\%$. Теперь переведём десятеричное число 143 в двоичную систему исчисления. Получаем двоичное число 10001111 — это и есть цифровое значение дискретного сигнала относительной экспозиции в первом кадре.

В общем случае разрядность цифрового сигнала должна выбираться исходя из порогов восприятия человеком того параметра изображения или звука, который переводится в цифровой формат. Например, если в цифровой формат переводится яркость, то при определении необходимой разрядности цифрового сигнала следует учесть динамический диапазон возможных яркостей в киноизображении и пороговые значения восприятия яркости человеком.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Киноизображение представляет собой совокупность виртуальных световых и звуковых образов, демонстрируемых зрителю при кинопоказе. Воспринимаемые зрителем образы должны соответствовать предыдущему жизненному зрительному и слуховому опыту человека, чтобы зрительные и слуховые механизмы восприятия работали так же, как в обычной жизни.

В процессе записи светового и звукового полей при киносъёмке, их дальнейшего преобразования и обработки и демонстрации зрителю созданного кинофильма, сигналы киноизображения и звука подвергаются записи, преобразованию и воспроизведению. При этом, поскольку сигналы киноизображения зависят от большего количество пара́метров, чем количество параметров, по которым может зафиксировать киноизображение носитель информации, то информация, связанная с некоторыми параметрами, неизбежно теряется либо подвергается дискретизации. А в цифровых кинотехнологиях киноизображение и звук записываются, обрабатываются и хранятся в цифровом формате, что невозможно без дискретизации сигналов киноизображения и звука по всем параметрам.

В результате дискретизации могут возникнуть искажения первого рода, проявляющиеся следующим образом:

— в киноизображении появляются ложные низкие частоты в спектре дискретного сигнала, которых не было в спектре снимаемых объектов, воспринимаемые зрителем как появление муарного узора, размытие границ объектов, чередо-

вание зон резко изображаемого пространства, стробоскопические явления, замедление скоростей (вплоть до остановки) движущихся в кадре объектов;

— в звуке появление ложных низких частот, которых не было в исходном звуке до его записи.

Для исключения возможности появления искажений первого рода необходимо соблюдать требования теоремы Котельникова, а для этого до дискретизации пропускать сигналы киноизображения и звука через фильтры низких частот. Однако в настоящее время в процессе записи киноизображений, в отличие от записи звука, технически это не всегда выполнимо, в результате чего и появляются в киноизображении искажения первого рода.

При восстановлении киноизображения и звука для их демонстрации зрителям, сигналы киноизображения и звука снова должны быть пропущены через фильтры низких частот для устранения ложных спектров в сигналах, появившихся в результате дискретизации. В акустических системах это выполняется всегда, а в системах преобразования и демонстрации киноизображений не всегда. В результате в киноизображении возможно появление искажений второго рода, которые могут восприниматься зрителем, например, как ступенчатость границ объектов или высокочастотное мигание изображения.

Понимание причин появления в современных кинофильмах рассмотренных в книге искажений киноизображения, возникающих в результате дискретизации киноизображения по времени, пространственным координатам и длине волны света, позволяет определить направления необходимого дальнейшего совершенствования кинотехнологий и кинотехники. А знание основ теории записи, преобразования и воспроизведения киноизображения и их применение позволят операторам уменьшить вероятность появления возможных искажений киноизображения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аблеков В.К., Зубков П.И., Фролов А.В. Оптическая и оптоэлектронная обработка информации. М.: Машиностроение, 1976. 256 с.

2. Агранович М.Л., Раев О.Н. Этапы развития образовательного процесса подготовки кинооператоров // Инновационные технологии в кинематографе и образовании: III Международная научно-практическая конференция, Москва, 28–30 сентября 2016 г.: материалы и доклады / под общей редакцией О.Н. Раева. М.: ВГИК, 2016. С. 212–218.

3. Алдошина И.А., Приттс Р. Музыкальная акустика. Учебник. СПб.: Композитор * Санкт-Петербург, 2006. 720 с.

4. Березин О.С. Российская киноиндустрия 4.0 — цифровые кинофабрики или прогнозирование за гранью понимания // Инновационные технологии в кинематографе и образовании: IV Международная научно-практическая конференция, Москва, 26–29 сентября 2017 г.: материалы и доклады / под общей редакцией О.Н. Раева. М.: ВГИК, 2017. С. 9–33.

5. Быков Р.Е. Основы телевидения и видеотехники. М.: Горячая линия—Телеком, 2006.

6. Ватолин Д.С., Боков А.А. Возможности рендеринга кадров плеоптических камер // Инновационные технологии в кинематографе и образовании: III Международная научно-практическая конференция, Москва, 28–30 сентября 2016 г.: материалы и доклады / под общей редакцией О.Н. Раева. М.: ВГИК, 2016. С. 16–27.

7. Вахитов Ш.Я., Ковалгин Ю.А., Фадеев А.А., Щевьев Ю.П. Акустика: учебник для вузов / под ред. Ю.А. Ковалгина. М.: Горячая линия—Телеком, 2009. 660 с.

8. Взгляд изнутри: матрицы цифровых камер. http://habrahabr.ru/post/143169/ (дата обращения 17.11.2013).

9. Годен Ж. Колориметрия при видеообработке. М.: Техносфера, 2008. 328 с.

10. Голдовский Е.М. Избранные статьи. М.: Искусство, 1979.

11. Головня А.Д. Мастерство кинооператора. М.: Искусство, 1995.

12. Гольденберг Л.М., Матюшкин Б.Д., Поляк М.Н. Цифровая обработка сигналов: Справочник. М.: Радио и связь, 1985. 312 с.

13. Голямина И.П. Звук // Большая советская энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1976. Том 9. С. 432–434. Ст. 1284–1288.

14. Гордеев В.Ф., Раев О.Н. История российской кинотехники: Московское конструкторское бюро киноаппаратуры. М.: ФГУП «МКБК», 2009. 136 с.

15. Гребенников О.Ф. Киносъёмочная аппаратура. Л.: Машиностроение, 1971. 352 с.

16. Гребенников О.Ф. Основы записи и воспроизведения изображений (в кинематографе): учебное пособие для вузов кинематографии. М.: Искусство, 1982. 239 с.

17. Гребенников О.Ф., Тихомирова Г.В. Основы записи и воспроизведения информации (в аудиовизуальной технике): учебное пособие. СПб.: СПбГУКиТ, 2002. 712 с.

18. Гудмен Д. Введение в Фурье-оптику. М.: Мир, 1970. 364 с.

19. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. Теория оптических систем. М.: Машиностроение, 1992. 432 с.

20. Игнатьев Н.К. Дискретизация и её приложения. М.: Связь, 1980. 264 с.

21. Костин В.Н., Носуленко В.Н., Русинова Е.А., Сологубов А.Н. Новые подходы формирования пространственного звукового образа в кинематографе // Инновационные технологии в кинематографе и образовании: III Международная научно-практическая конференция, Москва, 28–30 сентября 2016 г.: материалы и доклады. М.: ВГИК, 2016. С. 124–131.

22. Котельников В.А. О пропускной способности «эфира» и проволоки в электросвязи. М.: Изд-во управления связи РККА, 1933.

23. Красильников Н.Н. Теория передачи и восприятия изображения. М.: Связь, 1986.

24. Мудрёнов П.А. Методика определения фотографической разрешающей способности цифрового изображения // Инновационные технологии в кинематографе и образовании: IV Международная научно-практическая конференция, Москва, 26–29 сентября 2017 г.: материалы и доклады / под общей редакцией О.Н. Раева. М.: ВГИК, 2017. С. 86–98.

25. Новик Ф.С., Ногин П.А. Киносъёмочная оптика. М.: Искусство, 1968.

26. Оптические приборы в машиностроении. Справочник. М.: Машиностроение, 1974. 238 с.

27. Папулис А. Теория систем и преобразований в оптике / пер. с англ. под редакцией В.И. Алексеева. М: Мир, 1971. 495 с.

28. Перспектива // Большая советская энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1976. Том 19. С. 442. Ст. 1312–1315.

29. Перспектива // Словарь русского языка. М.: Русский язык, 1987. Том 3. С. 111–112.

30. Порфирьев Л.Ф. Основы теории преобразования сигналов в оптико-электронных системах. Учебник для студентов приборостроительных специальностей вузов. Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1989. 387 с.

31. Прикладная оптика: учебное пособие / под ред. Н.П. Заказнова. 3-е изд., стер. СПб.: Лань, 2009. 320 с.

32. Раев О.Н. Глубина пространства в кинофильме // Инновационные технологии в кинематографе и образовании: II Международная научно-практическая конференция, Москва, 21–25 сентября 2015 г.: материалы и доклады. М.: ВГИК, 2015. С. 30–45.

33. Раев О.Н. Дискретизация глубины киноизображения при цифровой стереосъёмке // Мир техники кино. 2012. № 3. С. 10–16.

34. Раев О.Н. Дискретизация изображения при цифровой стереосъёмке // Кинооператорское искусство России: тради-

ции и инновации: научно-практическая конференция, Москва, 18–20 ноября 2013 г.: материалы и доклады. М.: ВГИК, 2013. С. 196–211.

35. Раев О.Н. Искажения глубины пространства при цифровой стереосъёмке, вызванные дискретизацией сигнала изображения по горизонтальной пространственной координате // Запись и воспроизведение объёмных изображений в кинематографе и других областях: IV Международная научно-техническая конференция, Москва, 26–27 апреля 2012 г.: материалы и доклады. М.: МКБК, 2013. С. 67–88.

36. Раев О.Н. Киносъёмка движущихся автомобилей // Мир техники кино. 2008. № 8. С. 10–13.

37. Раев О.Н. Киносъёмка телевизионных изображений // Мир техники кино. 2008. № 10. С. 5–9.

38. Раев О.Н. Линейная перспектива в киноизображении // Запись и воспроизведение объемных изображений в кинематографе и других областях: VIII Международная научно-практическая конференция, Москва, 25–26 апреля 2016 г.: материалы и доклады. М.: ВГИК, 2016. С. 74–82.

39. Раев О.Н. Математическое моделирование киносъёмочной аппаратуры // Мир техники кино. 2009. № 12. С. 30–34.

40. Раев О.Н. Методика проектирования обтюраторов киносъёмочных аппаратов. Обзор / НИКФИ. Вып. 5(112). 1989. 80 с.

41. Раев О.Н. Расчет геометрических параметров обтюратора киносъёмочного аппарата // Труды НИКФИ «Киносъёмочный аппарат и его системы». 1983. Вып. 115. С. 62–76.

42. Раев О.Н. Способы оценки пространственного сдвига киноплёнки в киносъёмочной аппаратуре. Обзорная информация / НИКФИ. Кинофототехника. М., 1987. Вып. 1(92).

43. Раев О.Н., Чесноков В.Н. Киносъёмка интерьера с телевизионным изображением // Техника кино и телевидения. 1986. № 1. С. 11–16.

44. Размеры колёс. http://www.shinservice.ru/disk_catalog/model/ (дата обращения 14.11.2017).

45. Рожков С.Н., Овсянникова Н.А. Стереоскопия в кино-, фото-, видеотехнике. Терминологический словарь. М.: Парадиз, 2003. 136 с.

46. Рожкова Г.И., Алексеенко С.В. Зрительный дискомфорт при восприятии стереоскопических изображений как следствие непривычного распределения нагрузки на разные механизмы // Запись и воспроизведение объёмных изображений в кинематографе и других областях: III Международная научно-техническая конференция, Москва, 21–22 апреля 2011 г.: материалы и доклады. М.: МКБК, 2012. С. 19–46.

47. Тихомирова Г.В., Лапшин В.А., Карпишин Ф.И. Пути устранения заметности мельканий изображения в кинематографе // Техника кино и телевидения. 2002. № 4.

48. Топ-25 машин в России 2016 года. Самые популярные автомобили российского рынка за минувшие 12 месяцев. https://motor.ru/selector/top25-2.htm (дата обращения 14.11. 2017).

49. Фотокинотехника / гл. ред Е.А. Иофе. М.: Советская Знциклопедия, 1981. 447 с.

50. Шамшинова А.М., Волков В.В. Функциональные методы исследования в офтальмологии. М.: Медицина, 2004. 432 с.

51. http://mpe.edu.ru/academy/ (дата обращения 10.12. 2017).

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 3
1. Понятие о световом поле 6
2. Преобразование сигналов киноизображения в геометрической оптике 11
2.1. Формирование оптического изображения объективом 11
2.2. Развёртка и дискретизация киноизображения . . 15
2.3. Передача глубины пространства 17
2.3.1. Как человек воспринимает глубину окружающего пространства 17
2.3.2. Особенности восприятия изображения при просмотре кинофильмов 21
2.3.3. Линейная перспектива в кинематографе . . 23
2.3.4. Линейная перспектива при киносъёмке . . . 26
2.3.5. Линейная перспектива при кинопоказе . . . 28
2.4. Преобразование резкости в изображениях объектов при киносъёмке 32
2.5. Структура изображения, формируемого на светочувствительном слое матрицы 35
Выводы 36
3. О теории преобразования сигналов в кинематографе . 38
3.1. Сигнал киноизображения 39
3.2. Преобразования сигнала киноизображения . . . 40
3.3. Частотные характеристики кинематографической системы 41

3.4. Преобразования сигнала киноизображения при его дискретизации 46
3.5. Искажения сигнала киноизображения, вызванные его дискретизацией 49
Выводы 52
4. Временны́е искажения киноизображения 53
4.1. Неравномерность яркости объектов киносъёмки 56
4.2. Безинерционные источники света 57
4.3. Освещение объектов киносъёмки импульсными источниками света 60
Выводы 60
5. Пространственные искажения цифровых киноизображений 62
5.1. Разрешающая способность при цифровой киносъёмке 71
Выводы 73
6. Пространственно-временны́е искажения киноизображений 75
6.1. Киносъёмка объектов, совершающих периодическое движение 76
6.2. Киносъёмка объектов с периодической пространственной структурой, при их движении относительно кинокамеры 78
6.3. Киносъёмка движущегося автомобиля 80
Выводы 91
6.4. Киносъёмка телевизионных изображений 92
6.4.1. Киносъёмка интерьера с работающим телевизором на базе электронно-лучевой трубки 94
6.4.2. Киносъёмка интерьера с работающим жидкокристаллическим экраном 102
6.4.3. Киносъёмка интерьера с работающим плазменным экраном 104
6.4.4. Киносъёмка интерьера с работающим светодиодным экраном 105
Выводы 106

6.5. Киносъёмка интерьера с работающими компьютерными мониторами 107
7. Цветовые искажения цифровых киноизображений . . 110
8. Дискретизация звука в цифровых акустических системах 114
8.1. Физическая природа звука 114
8.2. Необходимый миимум сведений о слуховом восприятии человека 117
8.3. Преобразование звукового сигнала в цифровых акустических системах 118
Выводы 120
9. Квантование дискретных сигналов 121
Заключение 126
Литература 128

Раев Олег Николаевич

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ И ЗВУКА ПРИ КИНОСЪЁМКЕ

Всероссийский государственный институт кинематографии
имени С.А. Герасимова
129226, Москва, ул. В. Пика, д. 3.

Подписано в печать 08.12.2017 г. Формат 60×90/16.
Тираж 500 экз. Первый завод 100 экз.
Печать цифровая. Усл. печ. листов 8,5. Заказ 6573.

Отпечатано в типографии «Канцлер» (ООО ПКФ «Союз-пресс»).
150064, Ярославль, Полушкина роща, 16.